



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – AGUA

INACTIVACIÓN CON OZONO DEL NEMÁTODO
Meloidogyne enterolobii EN AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA

IQ. ITZEL ANAHÍ LANDA FERNÁNDEZ

TUTORES PRINCIPALES

DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR

DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. ALEJANDRA MARTÍN DOMÍNGUEZ, INSTITUTO MEXICANO DE
TECNOLOGÍA DEL AGUA

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE DE 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Alejandra Martín Domínguez
Secretario: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía
Vocal: Dra. Gloria Luz Carrión Villarnovo
1^{er.} Suplente: Dra. María Teresa Orta Ledesma
2^{do.} Suplente: Dr. Ignacio Monje Ramírez

Lugar donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015. No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del 09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020.



La autora agradece el apoyo otorgado mediante el proyecto 231215 del Programa de estímulos a la innovación PEI – CONACyT.

TUTORES DE TESIS

DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ

**DRA. MARÍA TERESA ORTA
LEDESMA**

FIRMA

FIRMA

DEDICATORIA

A Dios

Por permitirme llegar a este momento, por haber puesto en mi camino a grandes seres humanos que me guiaron y apoyaron durante la maestría.

A mis padres

Con mucho cariño, que han estado conmigo siempre, por brindarme su amor y confianza, por apoyarme incondicionalmente y porque nunca han dejado de creer en mí. Gracias por brindarme el amor y la fuerza necesaria para alcanzar cada una de las metas que me he propuesto. Mamá, gracias por tu infinita paciencia, por tus palabras de aliento, por corregir mis faltas y celebrar mis triunfos. Papá, gracias por tus consejos, por siempre alentarme a hacer más y ser mejor. Los amo con todo mi corazón.

A mi hermano

Por estar a mi lado siempre, por ser mi mejor amigo y un increíble ser humano.

A mi familia

Por ser incondicionales y estar en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, me enorgullece enormemente haber pertenecido a esta casa de estudios.

Al Dr. Ignacio Monje, por la confianza y el apoyo que me ha brindado, por todo su tiempo y dedicación, por aconsejarme en la elaboración de este proyecto y por su valiosa amistad.

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma, por sus enseñanzas y orientación. Me considero afortunada de haber pertenecido a su grupo de investigación.

A las integrantes de mi comité tutor, la Dra. Alma Chávez y la Dra. Alejandra Martín, por su asesoramiento, aportes y por el valioso tiempo que dedicaron a mi tesis.

A la Dra. Gloria Carrión, por sus observaciones y recomendaciones a mi trabajo.

A la Mtra. Isaura Yáñez, por toda la ayuda brindada durante mi estancia.

Al Instituto de Ingeniería – UNAM y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA), gracias por permitirme hacer uso de sus instalaciones y servicios.

A mis compañeros y amigos del grupo de trabajo, les agradezco los consejos, el apoyo y su amistad.

A todos los que contribuyeron a la realización de esta tesis, ¡Muchas gracias!

RESUMEN

Cada año, los nemátodos fitoparásitos disminuyen el rendimiento de los cultivos de alto valor en todo el mundo, causando pérdidas anuales de alrededor del 14%. El nemátodo agallador *Meloidogyne enterolobii* ha cobrado importancia, a nivel mundial y en México, por su agresividad, distribución geográfica creciente y amplio rango de hospederos. Los nemátodos se reproducen en las raíces de las plantas, pero un vehículo de diseminación es el agua utilizada en el riego. El método más común de desinfección de agua es la cloración, sin embargo, resulta poco efectiva. Por ello, se han explorado otros métodos más eficientes para la inactivación de microorganismos patógenos altamente resistentes a la desinfección, entre los que se perfila el ozono.

En este estudio se evaluó la aplicación de ozono en agua con fines de riego, como alternativa de control del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* y se determinaron las condiciones para lograr su inactivación. Para ello, se utilizaron nemátodos de la especie *M. enterolobii*, extraídos previamente de raíces agalladas de plantas de tomate. En los ensayos de inactivación, una suspensión de huevos de dicha especie, fue inoculada al agua de riego. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de inactivación en una unidad de ozonización a escala laboratorio. El desempeño de los tratamientos fue evaluado a través de la viabilidad de los huevos mediante la valoración de su estructura por microscopía óptica.

Como resultado de la exposición al ozono, se encontró que la viabilidad de 20 huevos de nemátodos por litro se redujo en su totalidad con una concentración de ozono residual de 0.55 mg/L y tiempos de contacto de 15 min, lo que corresponde a un valor de CT de 8.25 mg-min/L. Asimismo, se evaluó el efecto de la temperatura del agua y el contenido de alcalinidad y materia orgánica del agua. Se encontró que a 35°C la tasa de inactivación de los nemátodos con ozono disminuyó 22.5% mientras que, con alcalinidades de 100 mgCaCO₃/L se registró una reducción de 17.5%. La materia orgánica no mostró un efecto significativo bajo las condiciones evaluadas en este trabajo.

Se realizó una estimación de costos, tanto de capital como de operación y mantenimiento, para la integración de un sistema de ozonización al tratamiento que actualmente recibe el agua antes de ser distribuida a los cultivos a través del sistema de riego. Finalmente, de esta investigación se concluye que la ozonización es una alternativa técnica y económicamente viable como una medida de control de la presencia del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* en el agua de riego, lo cual podría tener un impacto en la reducción de afectaciones agrícolas causadas por estos organismos.

ABSTRACT

Plant-parasitic nematodes represent 14% of annual losses in high-value crops worldwide. Currently *Meloidogyne enterolobii* has increased its importance due to its high aggressiveness, increasing geographical distribution and host range. Root-knot nematodes inhabit the rhizosphere soil around plant roots. However, a vehicle of dissemination is the irrigation water. Common water disinfection methods, as chlorination, are not effective enough for inactivating these parasites. Therefore, other more efficient methods for the inactivation of resistant pathogenic microorganisms have been explored, among which ozone is outlined.

In this study, the ozone application in irrigation water was evaluated as a control alternative of root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* and the conditions for its inactivation also were determined. For this purpose, nematodes (*M. enterolobii*), previously isolated from tomato roots, were used. For the tests, nematode eggs were inoculated in irrigation water. Subsequently, the disinfection process was carried out in a lab-scale ozonation unit. The performance of the treatments was evaluated through the egg's viability by assessing its structure by optical microscopy.

Because of exposure to ozone, the viability of 20 nematode eggs per liter was reduced in its entirety; with residual ozone concentration in water equal to 0.55 mg/L for 15 minutes that corresponds to a CT-value 8.25 mg-min/L. Additionally, the effect of temperature, alkalinity and organic matter of the water was evaluated. It was found that at high temperature values (35°C) the inactivation rate of nematodes with ozone decreased 22.5% while alkalinities of 100 mgCaCO₃/L a reduction of 17.5% was registered. Organic matter did not show a significant effect under the conditions evaluated.

In addition, an estimation of capital and operation and maintenance (O&M) costs was made for integrating an ozonation system to the current water treatment before being distributed to the crops through the irrigation system. Finally, from this research it is concluded that ozonation a technically and economically viable alternative for the inactivation of the root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* in irrigation water, which could have an impact on reduction of agricultural affectations caused by these organisms.

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

Landa-Fernández, I.A., Monje-Ramírez, I. and Orta-Ledesma, M.T. (June 17 – 20, 2018).

Inactivation of root-knot nematode eggs Meloidogyne enterolobii in irrigation water treated with ozone. First International Conference on Water Security. Toronto, Canada.

Landa-Fernández, I.A., Monje-Ramírez, I. and Orta-Ledesma de Velásquez, M.T. (August 20 –

23, 2018). *How increase the tomato crop using ozone as irrigation water disinfection method.*

International Ozone Association - PAG Conference. Las Vegas, EE. UU.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2 ANTECEDENTES | 2 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| 1.4 HIPÓTESIS..... | 5 |
| 1.5 OBJETIVOS | 5 |
| 1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES | 5 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 RIEGO AGRÍCOLA | 6 |
| 2.1.1 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO..... | 6 |
| 2.1.2 MANEJO DEL AGUA EN LA IRRIGACIÓN | 8 |
| 2.2 NEMÁTODOS..... | 9 |
| 2.2.1 MORFOLOGÍA..... | 9 |
| 2.2.2 CICLO DE VIDA | 9 |
| 2.2.3 HUEVOS DE NEMÁTODO | 11 |
| 2.2.4 MELOIDOGYNE..... | 12 |
| 2.2.5 AFECTACIONES EN MÉXICO POR <i>MELOIDOGYNE ENTEROLOBII</i> | 13 |
| 2.3 NEMÁTODOS FITOPARÁSITOS EN AGUA DE RIEGO | 14 |
| 2.3.1 RESISTENCIA DE LOS NEMÁTODOS A LA DESINFECCIÓN | 15 |
| 2.4 MEDIDAS DE CONTROL EN EL SUELO | 16 |
| 2.5 DESINFECCIÓN CON OZONO..... | 17 |
| 2.5.1 CONCEPTO CT | 18 |
| 2.5.2 MECANISMOS DE DESINFECCIÓN..... | 20 |
| 2.5.3 DESCOMPOSICIÓN DEL OZONO EN EL AGUA | 22 |
| 2.5.4 SISTEMA DE OZONIZACIÓN..... | 24 |
| 2.5.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS..... | 30 |
| 2.5.6 INACTIVACIÓN CON OZONO DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS | 30 |
| 2.5.7 BENEFICIOS DEL OZONO EN LA AGRICULTURA..... | 31 |
| CAPÍTULO III. METODOLOGÍA | 32 |
| 3.1 NEMÁTODO DE PRUEBA | 33 |
| 3.1.1 PRESERVACIÓN | 33 |
| 3.1.2 RECUPERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN | 33 |
| 3.2 AGUA SINTÉTICA | 34 |
| 3.3 ARREGLO EXPERIMENTAL | 35 |
| 3.4 ENSAYOS PREVIOS A LA DESINFECCIÓN | 36 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.4.1 | CONDICIONES DE FLUJO DE GAS Y MEZCLA EN EL REACTOR | 36 |
| 3.4.2 | DEMANDA INMEDIATA DE OZONO Y CONCENTRACIÓN RESIDUAL | 36 |
| 3.5 | EXPERIMENTOS DE INACTIVACIÓN DE <i>M. ENTEROLOBII</i> CON OZONO..... | 37 |
| 3.5.1 | PRUEBAS PRELIMINARES DE INACTIVACIÓN | 37 |
| 3.5.2 | DISEÑO DE EXPERIMENTOS A | 37 |
| 3.5.3 | DISEÑO DE EXPERIMENTOS B..... | 39 |
| 3.5.4 | DISEÑO DE EXPERIMENTOS C..... | 40 |
| CAPÍTULO IV. | RESULTADOS..... | 41 |
| 4.1 | EFFECTO DEL OZONO SOBRE <i>MELOIDOGYNE ENTEROLOBII</i> | 41 |
| 4.2 | ANÁLISIS DE OZONO..... | 42 |
| 4.3 | INACTIVACIÓN DEL NEMÁTODO <i>MELOIDOGYNE ENTEROLOBII</i> MEDIANTE EL PROCESO DE OZONIZACIÓN | 43 |
| 4.3.1 | ENSAYOS PRELIMINARES DE INACTIVACIÓN | 43 |
| 4.3.2 | EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO RESIDUAL, TIEMPO DE CONTACTO Y NÚMERO DE HUEVOS..... | 45 |
| 4.3.3 | EFFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA Y TEMPERATURA | 47 |
| 4.3.4 | INCREMENTO DE LA TASA INACTIVACIÓN | 51 |
| 4.4 | DISEÑO CONCEPTUAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO | 55 |
| 4.5 | FACTIBILIDAD TÉCNICA | 56 |
| 4.5.1 | COMPONENTES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO CON OZONO | 56 |
| 4.5.2 | GENERACIÓN DE OZONO Y GAS DE ALIMENTACIÓN | 57 |
| 4.5.3 | REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN OZONO | 57 |
| 4.5.4 | REACTOR DE BURBUJA FINA | 58 |
| 4.6 | ESTIMACIÓN DE COSTOS..... | 61 |
| 4.6.1 | ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CAPITAL..... | 61 |
| 4.6.2 | ESTIMACIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO | 61 |
| CAPÍTULO V. | CONCLUSIONES | 63 |
| 5.1 | RECOMENDACIONES | 63 |
| REFERENCIAS | | 64 |
| ANEXOS | | 72 |
| ANEXO I. | SISTEMA DE OZONIZACIÓN | 72 |
| ANEXO II. | HOJAS TÉCNICAS DE GENERADORES DE OZONO | 73 |
| ANEXO III. | METODOLOGÍA PARA ESTIMACION DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE OZONIZACIÓN .. | 78 |
| ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CAPITAL..... | | 78 |
| ESTIMACIÓN DEL COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO | | 82 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tratamientos para el manejo de nemátodos en fuentes de agua de riego | 3 |
| Tabla 2. Parámetros de calidad del agua de riego | 7 |
| Tabla 3. Ciclo de vida de los nemátodos | 9 |
| Tabla 4. Características de las membranas de la pared de los huevos | 11 |
| Tabla 5. Producción nacional de tomate en México en 2016 | 13 |
| Tabla 6. Meloidogyne en agua de riego | 14 |
| Tabla 7. Inactivación con ozono del 99% de los microorganismos | 19 |
| Tabla 8. Composición porcentual promedio de las fracciones de la MOD en agua superficial | 23 |
| Tabla 9. Análisis químico de agua superficial* | 23 |
| Tabla 10. Comparación de los gases de alimentación para sistemas de ozonización | 25 |
| Tabla 11. Comparación de los generadores de ozono | 26 |
| Tabla 12. Ventajas y desventajas de los contactores G-L | 29 |
| Tabla 13. Composición del agua sintética de prueba | 34 |
| Tabla 14. Parámetros de calidad del agua de riego | 34 |
| Tabla 15. Composición fisicoquímica del agua sintética | 34 |
| Tabla 16. Ecuaciones de balance de masa de ozono en reactor por lote | 36 |
| Tabla 17. Factores y dominio experimental de las pruebas preliminares | 37 |
| Tabla 18. Factores y dominio experimental A | 38 |
| Tabla 19. Matriz del diseño y plan de experimentación A | 38 |
| Tabla 20. Factores y dominio experimental B | 39 |
| Tabla 21. Matriz del diseño y plan de experimentación B | 39 |
| Tabla 22. Factores y dominio experimental C | 40 |
| Tabla 23. Matriz del diseño y plan de experimentación C | 40 |
| Tabla 24. Resultados de la prueba preliminar I | 43 |
| Tabla 25. Resultados de la prueba preliminar II | 44 |
| Tabla 26. Resultados del diseño de experimentos A | 45 |
| Tabla 27. Análisis de varianza (A) | 46 |
| Tabla 28. Resultados del diseño de experimentos B | 47 |
| Tabla 29. Efectos estimados (B) | 48 |
| Tabla 30. Análisis de varianza I (B) | 49 |
| Tabla 31. Análisis de varianza II (B) | 50 |
| Tabla 32. Resultados del diseño de experimentos C | 51 |
| Tabla 33. Análisis de varianza (C) | 52 |
| Tabla 34. Balance de ozono (C) | 52 |
| Tabla 35. Producción de ozono a escala industrial | 57 |
| Tabla 36. Requerimientos de agua y ozono | 57 |
| Tabla 37. Generadores de ozono disponibles en el mercado | 58 |
| Tabla 38. Especificaciones de los generadores de ozono del mercado | 58 |
| Tabla 39. Características del contactor G-L | 59 |
| Tabla 40. Costos de capital estimados | 61 |
| Tabla 41. Costos de operación y mantenimiento | 61 |
| Tabla 42. Valor de venta de la producción de tomate | 62 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Manejo típico del agua de riego | 8 |
| Figura 2. Ciclo de vida del Género <i>Meloidogyne</i> | 10 |
| Figura 3. Agallamiento radical en plantas de tomate inducido por <i>M. enterolobii</i> | 12 |
| Figura 4. Resistencia microbiana a los biocidas | 15 |
| Figura 5. Descomposición del ozono en solución acuosa | 20 |
| Figura 6. Esquema del proceso de ozonización | 24 |
| Figura 7. Contactor con difusores de burbuja fina | 27 |
| Figura 8. Inyectores de ozono | 28 |
| Figura 9. Mezclador de turbina | 29 |
| Figura 10. Diagrama conceptual de la metodología utilizada | 32 |
| Figura 11. Arreglo experimental I | 35 |
| Figura 12. Arreglo experimental II | 35 |
| Figura 13. Huevos viables de <i>Meloidogyne enterolobii</i> | 41 |
| Figura 14. Huevos no viables de <i>Meloidogyne enterolobii</i> | 41 |
| Figura 15. Demanda de ozono del agua sintética | 42 |
| Figura 16. Concentración de ozono residual del agua sintética | 42 |
| Figura 17. Resultados de la prueba preliminar I | 43 |
| Figura 18. Resultados de la prueba preliminar II | 44 |
| Figura 19. Resultados de las pruebas de inactivación | 45 |
| Figura 20. Gráfica de efectos principales (A) | 46 |
| Figura 21. Superficie de contorno de Inactivación vs Tiempo y $[O_3]_r$ | 47 |
| Figura 22. Diagrama de Pareto (B) | 48 |
| Figura 23. Gráfica mitad – normal (B) | 49 |
| Figura 24. Gráfica de efectos principales para inactivación (B) | 50 |
| Figura 25. Gráfica de interacción para inactivación (B) | 51 |
| Figura 26. Superficie de contorno de Inactivación vs Temperatura y C_{ge} | 51 |
| Figura 27. Superficie de contorno de Inactivación vs Temperatura y Tiempo | 52 |
| Figura 28. Tratamiento de agua de riego | 55 |
| Figura 29. Tratamiento con ozono de agua de riego | 55 |
| Figura 30. Componentes principales de un sistema de ozonización | 56 |
| Figura 31. Concentración de ozono residual dentro del contactor G-L | 60 |
| Figura 32. Diseño de la cámara de contacto y balance de ozono | 60 |
| Figura 33. Diagrama de flujo del sistema de ozonización | 72 |
| Figura 34. Costo estimado para los equipos del sistema de generación de ozono | 78 |
| Figura 35. Costo estimado para el contactor de ozono | 79 |
| Figura 36. Área de construcción estimada para el equipo de ozono | 80 |
| Figura 37. Estimación del costo de capital del sistema de ozonización | 81 |
| Figura 38. Estimación del costo de operación de un sistema de ozono | 84 |

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Un hecho relevante en la producción de alimentos es la incidencia de factores que afectan la producción agrícola. De acuerdo con la Sociedad Americana de Fitopatología (APS), a los nemátodos fitopatógenos se les atribuye el 14% de las pérdidas anuales de diferentes cultivos en el mundo, equivalente a 80 billones USD/año. Los nemátodos son gusanos microscópicos no segmentados que habitan en el suelo e infectan a las plantas a través de las raíces. Otra vía de contacto de estos fitopatógenos es a través de los sistemas de riego (Hugo and Malan, 2010). El agua de riego contaminada se vuelve un medio de transporte de huevos, nemátodos juveniles y restos de raíces infestadas.

Los nemátodos agalladores (*Meloidogyne* spp.) son los de mayor importancia económica (Jones et al., 2013). *Meloidogyne* spp., afecta cultivos de alto costo en el mercado (e.g. tomate, sandía, chile) por lo que una disminución en la productividad implica un alto costo económico (Velásquez, 2001). Estos nemátodos reciben su nombre debido a que su alimentación causa agallas (nudos en las raíces) en la planta huésped. Dichas agallas restringen el paso de agua y nutrientes a la planta afectando su desarrollo. Provocan debilitamiento generalizado, aspecto de deshidratación y severa reducción de la producción, tanto en cantidad como en calidad del producto (Roberts et al., 2005).

En México, el tomate ha sido uno de los cultivos dañados por *Meloidogyne enterolobii* (Martínez et al., 2015) que, desde su detección en 2012, no ha podido ser controlado eficientemente. A nivel nacional, el sector del tomate ocupa la quinta posición entre los productos agrícolas, superando la producción de maíz, caña de azúcar, aguacate y chile (FIRA, 2017). México, junto con los Países Bajos y España son los mayores exportadores de tomate fresco del mundo. Estos países representan casi la mitad (46.55%) de las exportaciones mundiales de tomates frescos (FAOSTAT, 2016).

Entre los métodos convencionales para el combate de nemátodos en el suelo se tienen a los nematicidas. Sin embargo, además de su baja efectividad, está demostrado que la aplicación sistemática de compuestos químicos conlleva un riesgo potencial de daño al ambiente y a la salud por su toxicidad (Hernández et al., 2015). Por lo anterior, es imprescindible buscar y evaluar nuevas opciones de control que sean amigables con el ambiente. Además, los nemátodos fitoparásitos no solo se encuentran en el suelo, sino que también pueden dispersarse con el agua de riego. Todos los principales géneros de este tipo de nemátodos se han reportado en muestras de agua para la irrigación (Hugo and Malan, 2010).

El ozono (O₃) es una alternativa prometedora a los nematicidas como método de desinfección del agua de riego debido a su gran poder oxidante y cualidades desinfectantes y, por lo tanto, podría utilizarse en el control de nemátodos. Por lo antes expuesto, la presente tesis evalúa la aplicación de ozono para el control e inactivación del nemátodo agallador *Meloidogyne enterolobii* presente en agua riego del cultivo de tomate, con la finalidad de contribuir a la disminución de las pérdidas económicas sufridas en estados productores de esta hortaliza.

1.2 ANTECEDENTES

La aplicación de nematicidas, como medida de control, no ha sido lo suficientemente efectiva, ya que el problema se sigue presentando año tras año. Lo anterior puede deberse, en conjunto, a que no se cuenta con una fuente de agua de riego libre de nemátodos. A pesar de que el hábitat natural de estos organismos es el suelo, pueden incidir accidentalmente en el agua de irrigación y ser un medio de transporte para infestar los plantíos. Hugo y Malan (2010) describen la presencia de algunas especies de nemátodos (*Meloidogyne*, *Helicotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, *Hoplolaimus*) en diferentes fuentes de agua que se ocupan para el riego, tales como agua de pozos, agua de lluvia, estanques, lagos, represas, aguas residuales municipales, agua de escorrentía, canales de riego y ríos.

Por su parte, Faulkner y Bolander (1966) reportan un gran número de nemátodos en canales de riego del Estado de Washington, EE.UU. Dichos autores estimaron que cada vez que se irrigaba 0.4 ha de tierra, entre 4 y 10×10^6 parásitos vegetales se agregaban al suelo por el uso de agua contaminada. Waliullah (1989) encontró en muestras de agua de canales de riego entre 65 y 290 nemátodos por cada 50 L en el norte de la India y estimó que entre 90×10^6 y 470×10^6 nemátodos pasaron a través de los canales principales en un período de 24 h. En México, los cultivos de tomate consumen alrededor de 20 a 60 m³/ha/día, y dadas las concentraciones de nemátodos encontradas, se agregan al suelo entre 3000 y 9000 nemátodos/ha/día a través del agua de riego (Prado, 2017).

Los tratamientos reportados aplicados al agua para evitar que los nemátodos contaminen los cultivos son cloración, descarga eléctrica, filtración, tratamiento térmico, peróxido de hidrógeno, ozonización, sedimentación y floculación, radiación ultravioleta y una combinación de ellos (Tabla 1, Hugo and Malan, 2010). De acuerdo con la revisión bibliográfica, solo el 15% de los artículos estudian la capacidad del ozono para inactivar nemátodos, sin embargo, los que se tienen son antecedentes alentadores para utilizar el ozono como método de control de nemátodos en agua contaminada.

En 1991, Moens et al., estudiaron la sensibilidad de nemátodos juveniles de *Meloidogyne incognita* (J2) al ser expuestos a diferentes tiempos de ozonización. En los primeros cuatro minutos de oxidación, se logró inhibir su potencial de infección en plantas de tomate, alcanzando la inhibición completa después de 12 min de exposición. Algunas especies de nemátodos presentan mayor resistencia, como el nemátodo excavador *Radopholus similis*, el cual requiere tiempos de 60 min para su eliminación (Runia and Amsing, 1996). Por su parte, Sánchez et al. (2007) experimentaron la inactivación en agua sintética y agua de riego contaminada con diferentes especies de nemátodos (*C. elegans*, *A. fragariae*, *H. schachtii* y *Meloidogyne* spp.). En agua sintética los valores de concentración de ozono residual (mg/L) y tiempo de contacto (min) ("CT", mg-min/L o ppm-min) requeridos para inactivar el 90% de los nemátodos oscilaban entre 2 – 8 mg-min/L independientemente de la especie. La inactivación en agua de riego demandó valores más altos de CT (hasta 12 mg-min/L), lo cual es lógico si se toma en cuenta la demanda del ozono por los componentes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.

Tabla 1. Tratamientos para el manejo de nemátodos en fuentes de agua de riego

| Tratamiento | Descripción | Referencias |
|-----------------------------|--|--|
| Cloración | La cloración eficaz depende del tiempo de exposición del organismo al cloro libre, calidad, el contenido de cloro y el pH del agua. Altos niveles de cloro pueden ser fitotóxicos para ciertos cultivos. Resultados indican que algunas especies no pueden controlarse de forma efectiva únicamente mediante la cloración del agua de riego. | Grech and Rijkenberg, 1992; Runia, 1995 |
| Descarga eléctrica | Método poco investigado. Resultados muestran que el 10% de tasa de mortalidad de larvas podría deberse a la descarga eléctrica. | Dematte et al., 1993. |
| Filtración | La filtración lenta en arena no es completamente efectiva para la eliminación de nemátodos fitoparásitos del agua de riego, debido a que el tamaño de poro es grande. Sin embargo, la filtración de arena puede servir como primera barrera en un sistema de filtro combinado para eliminar la mayoría de los productos de contaminación orgánica del agua. | Amsing and Runia, 1995; Grech et al., 1989; Hallmann et al., 2005; Moens and Hendrickx, 1992; Van Os et al., 1999. |
| Tratamiento térmico | En general, los nemátodos presentes en raíces, bulbos y plantas no pueden sobrevivir a temperaturas superiores a 45°C durante más de 30 minutos. El tratamiento térmico directo del agua también es muy eficaz para la eliminación de estos organismos. | Hallmann et al., 2005; Runia and Amsing, 2001. |
| Peróxido de hidrógeno | El peróxido de hidrógeno fue efectivo en la eliminación de <i>R. similis</i> cuando se sometió a una concentración de 400 ppm o más durante al menos 24 h. | Runia and Amsing, 1996 |
| Ozonización | El ozono tiene propiedades fungicidas y bactericidas. Ha sido probado para inactivar algunas especies de <i>Meloidogyne</i> . La eficacia del ozono depende de la demanda de oxígeno del agua y la naturaleza de los compuestos de oxidación. | Moens et al., 1991; Runia and Amsing, 1996; Sanchez et al., 2007. |
| Sedimentación y floculación | Si se deja que el agua con nemátodos suspendidos sedimente, los nemátodos se asentarán en el fondo. Este proceso puede lograrse bombeando agua a una presa de sedimentación o un depósito. | Amsing and Runia, 1995; Hallmann et al., 2005. |
| Radiación ultravioleta | En la banda de onda corta de 200 a 280 nm (rayos UVC), la radiación de dicha luz genera un fuerte efecto germicida. Se recomienda una irradiación de 14 mJ.cm ⁻² para el control de nemátodos fitoparásitos cuando el agua pasa la unidad UV a una velocidad de flujo de 2.5 m ⁻³ h. La radiación ultravioleta no tiene ningún efecto sobre el medio ambiente y sería preferible al tratamiento químico. El principal factor limitante en el uso de UV es la calidad que tenga el agua a tratar. | Amsing and Runia, 1995; Grech et al., 1989; Hallmann et al., 2005; Moens and Hendrickx, 1989; Pieterse and Van Mieghem, 1987; Runia, 1994. |

Fuente: Hugo and Malan, 2010.

Existen también estudios donde se utiliza la irrigación directa del cultivo con agua ozonizada. Behzadi et al. (2002) utilizaron agua saturada con ozono con una concentración residual de 1.0 mg/L para irrigar cultivos de tomate dañados por nemátodos con presencia de nódulos en las raíces. Después de 20 días de tratamiento, la enfermedad fue controlada, el crecimiento de la planta mejoró y el rendimiento del cultivo aumentó entre 30 y 40%.

En la búsqueda de soluciones para el control de nemátodos el “ozono en fase gas” también ha sido aplicado directamente al suelo contaminado con nemátodos. Qiu et al. (2009) evaluaron diferentes dosis a un suelo franco arenoso recolectado de un campo de tomate contaminado con *M. javanica*. Con dosis equivalentes a 50 y 250 kg de O₃/ha, el contenido del nemátodo se redujo entre 24 y 68%. Los resultados sugieren que la textura del suelo, la humedad y el contenido de materia orgánica deben ser considerados para determinar la dosis de ozono necesaria para el control eficaz de nemátodos. Msayleb (2014) experimentó con muestras de suelo infestadas con nemátodos aplicando un nivel promedio de ozono de 2.1 gO₃/kg suelo durante 10 min y a una temperatura 5°C, dando como resultado un 96% de inhibición de los nemátodos.

Debido a que *Meloidogyne enterolobii* ha cobrado importancia a nivel mundial por su agresividad (capacidad del nemátodo para invadir y reproducirse en un huésped adecuado), distribución geográfica creciente y amplio intervalo de hospederos (Castagnone, 2012), el aporte de la presente tesis, frente a otros estudios, es demostrar la eficiencia del ozono sobre esta especie de nemátodo agallador en particular, ya que a la fecha no se cuenta con datos reportados sobre las condiciones de tratamiento con ozono en agua de riego como medida de control de nemátodos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

México se encuentra ubicado entre los principales exportadores de tomate a nivel mundial. El cultivo del tomate es de los más importantes debido a la superficie sembrada (51,861 Ha), los volúmenes de producción (3, 349,154 ton/año), los empleos generados y la entrada de divisas al país (1.38 USD/kg en 2011) (Observatorio de Precios, 2014; SIAP, 2016). No obstante, el rendimiento de este cultivo se ha visto afectado significativamente por la presencia del nemátodo agallador del género *Meloidogyne*. En estados como Sinaloa, las especies de mayor impacto, en orden de importancia son las siguientes: *M. enterolobii*, *M. javanica*, *M. incognita* y *M. hapla* (Retes, 2017). En el 2015, Martínez et al. reportaron daños en el híbrido de tomate cv Ramsés por la especie *M. enterolobii*, a pesar de que se sabe de la alta resistencia de este híbrido a otras especies de nemátodos.

En general, los métodos de control aplicados no han sido efectivos y a la fecha los productores mexicanos siguen enfrentándose a este problema. Debido a los graves daños que causa en los cultivos de tomate y a la rápida diseminación del nemátodo *M. enterolobii*; el presente estudio está enfocado a evaluar la tecnología del ozono como un método de control y tratamiento, en agua utilizada para el riego agrícola de tomate.

1.4 HIPÓTESIS

La aplicación de un tratamiento con ozono permitirá reducir considerablemente la viabilidad potencial de la población del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* presente en el agua para la irrigación agrícola.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones de tratamiento con ozono para la inactivación del nemátodo agallador *Meloidogyne enterolobii* en agua de riego.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto del ozono en muestras de agua sobre la inactivación de *Meloidogyne enterolobii* mediante la valoración de la estructura de los huevos del nemátodo.
- Determinar las condiciones de tratamiento (dosis de ozono, residual de ozono y tiempo de contacto; CT) para la inactivación de *Meloidogyne enterolobii* mediante la aplicación de un diseño de experimentos.
- Realizar el diseño conceptual del proceso de desinfección de agua de riego aplicado en el campo para implementar un sistema de ozonización.
- Determinar la factibilidad técnica y la viabilidad del proceso de desinfección de agua de riego propuesto con base en una estimación de costos de capital y operación y mantenimiento.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Se utilizó agua sintética para simular las características de un agua superficial para riego.
- El nemátodo de prueba *M. enterolobii* fue donado por la Dra. Gloria Luz Carrión Villarnovo, del Instituto de Ecología A.C. (INECOL), el cual fue aislado previamente de campos agrícolas con cultivos de tomate contaminados por esta especie.
- La concentración utilizada de huevos de nemátodo fue de 5 – 20 H/L. La concentración más alta que se ha encontrado en agua de riego en México es de hasta 3 nemátodos por cada 20 litros (Prado, 2017).
- Las pruebas de inactivación se realizaron en una unidad de ozonización escala laboratorio.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 RIEGO AGRÍCOLA

El uso más importante del agua es el agrícola, incluida la irrigación, la ganadería y la acuicultura (AQUASTAT, 2016). Las estimaciones varían, pero alrededor del 70% de todas las extracciones de agua dulce del mundo se destinan a usos agrícolas. La necesidad de riego surge a partir del incremento de la escasez alimentaria dado por el crecimiento de la población y la dificultad del cultivo en áreas semiáridas o secas. Además de que el riego permite la accesibilidad del cultivo donde no es viable por las condiciones climáticas, también permite intensificar la producción (Saccon, 2018). Los cultivos absorben los nutrientes del suelo y realizan funciones fisiológicas en presencia de agua. Cuando el suelo no tiene la cantidad suficiente de agua o no es oportuna su disponibilidad por medio de la lluvia o de fuentes naturales, se hace necesario el riego (Costa, y Aparicio, 2015).

México ocupa el séptimo lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.5 millones de hectáreas, de las cuales un poco más de la mitad corresponde a 86 distritos de riego, y el restante a más de 40 mil unidades. El 36% del agua concesionada para agrícola es de origen subterráneo, mientras que el 64% es de fuentes superficiales (CONAGUA, 2016).

2.1.1 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

Las fuentes más comunes de agua para uso en riego agrícola incluyen la de origen pluvial, agua superficial (ríos, lagos y embalses), agua subterránea (pozos) y agua residual tratada. La calidad del agua dependerá de la fuente (Brouwer et al., 1992). Uno de los factores más importantes en la producción intensiva de cultivos después de la disponibilidad, es la calidad del agua. El concepto de calidad se refiere a ciertos indicadores en el agua que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico y se clasifican de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas (Arshad and Shakoor, 2017).

Los índices o parámetros de calidad del agua para riego son: pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad, color, contenido de calcio y magnesio (Ca y Mg), carbonatos y bicarbonatos (CO_3^{2-} , HCO_3^-), y relación de adsorción de sodio (RAS) (Phocaidés, 2007). El pH debe encontrarse entre 6.5 – 8.4 (Ayers and Westcot, 1987). La conductividad depende de los iones disueltos en el agua, y de su carga y movimiento; cuando la conductividad eléctrica es alta, es indicativo de una concentración elevada de iones. La salinidad se mide indirectamente por los SDT e incluye: carbonatos, cloruros, bicarbonatos, fosfato, sulfatos, nitratos, sodio, calcio, magnesio, iones orgánicos, etc. Altas concentraciones de SDT afectan el proceso de fotosíntesis, ya que pueden combinarse con compuestos tóxicos y metales pesados. Los SST son partículas finas (microorganismos, algas, partículas minerales y materia orgánica) que pueden obstruir los sistemas de riego a presión, provocar un aumento de la temperatura del agua y disminuir el oxígeno disuelto. La RAS da información de las concentraciones de sodio, calcio y magnesio; una alta concentración de sodio afecta la conductividad hidráulica (permeabilidad) del suelo (Ayers and Westcot, 1987, Silva, 2004, Can et al., 2014, Arshad and Shakoor, 2017).

De acuerdo con la FAO (1992), la evaluación de los efluentes tratados se basa en criterios establecidos a nivel mundial, y se refieren a valores límite de ciertos parámetros físicos, químicos y biológicos con el fin de evitar posibles respuestas adversas. Los parámetros enlistados en la Tabla 2 determinan el nivel de idoneidad del agua residual tratada para su uso en riego. Los valores de los parámetros químicos y biológicos deben estar en niveles aceptables ya que siempre existe el riesgo de que el riego con aguas residuales pueda facilitar la transmisión de infecciones por nemátodos intestinales y enfermedades bacterianas fecales tanto a consumidores como a trabajadores agrícolas.

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua de riego

| Químicos | Físicos | Biológicos |
|--|---|---------------------------|
| Salinidad total, EC _w dS/m, SDT mg/l | Color | Coliformes totales/100 mg |
| Acidez / basicidad, pH | Olor | Coliformes fecales |
| Dureza, CaCO ₃ mg/l | Turbiedad, NTU | Nemátodos intestinales |
| Tipos y concentración de aniones y cationes, meq/l | DBO ₅ , mg/l (demanda bioquímica de oxígeno) | |
| Relación de adsorción de sodio, RAS | DQO, mg/l (demanda química de oxígeno) | |
| Nitrato - nitrógeno, NO ₃ -N mg/l | SS, mg/l (sólidos suspendidos) | |
| Fosfato – fósforo, PO ₄ -P mg/l | | |
| Elementos traza, mg/l | | |
| Metales pesados, mg/l | | |

Fuente: Phocaides, 2007.

Con la inclusión del reúso de las aguas residuales municipales tratadas en la agricultura, los parámetros de calidad del agua se ampliaron para cubrir las propiedades biológicas y microbiológicas del agua (helminthos, protozoos, bacterias y virus), que pueden causar impacto en el suelo, las plantas, el medio ambiente y a los consumidores (Phocaides, 2007).

En México, los indicadores de contaminación por patógenos y parásitos son los coliformes fecales y huevos de helminto. De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996*, el límite máximo permisible (LMP) para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml, para el promedio mensual y diario, respectivamente. Mientras que, para huevos de helminto, el LMP es de un huevo de helminto por litro para riego restringido, y de cinco huevos por litro para riego no restringido.

No obstante, en las regulaciones del agua de riego, los parámetros biológicos no van más allá de coliformes y nemátodos intestinales (también conocidos como helmintos y que parasitan al hombre, e.g. *Ascaris lumbricoides*), y únicamente se aplican cuando se emplea agua residual tratada. La presencia de microorganismos patógenos para el suelo y las plantas de cultivo en realidad no está normada en las legislaciones. Sin embargo, la detección de fitopatógenos en el agua de riego, cualquiera que sea la fuente, es de suma importancia para evitar su propagación a través de este medio y para poder tomar las medidas necesarias para evitar que el agua sea una vía más de contaminación de estos organismos.

*Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

2.1.2 MANEJO DEL AGUA EN LA IRRIGACIÓN

En algunas zonas agrícolas dedicadas al cultivo intensivo de tomate en México utilizan agua superficial como fuente principal. El agua es captada en presas y distribuida a través de canales para su posterior tratamiento y uso en el riego de cultivos. El manejo típico del agua en sistemas de riego a presión, de forma general se puede resumir en el diagrama de la Figura 1. Las agrícolas cuentan con cárcamos o estanques de almacenamiento, a partir de los cuales se bombea el agua y se hace pasar a través de sistemas de filtración. En algunos casos se agrega un desinfectante en línea o se aplica en el cárcamo de almacenamiento, y finalmente se adicionan los nutrientes, también en línea.

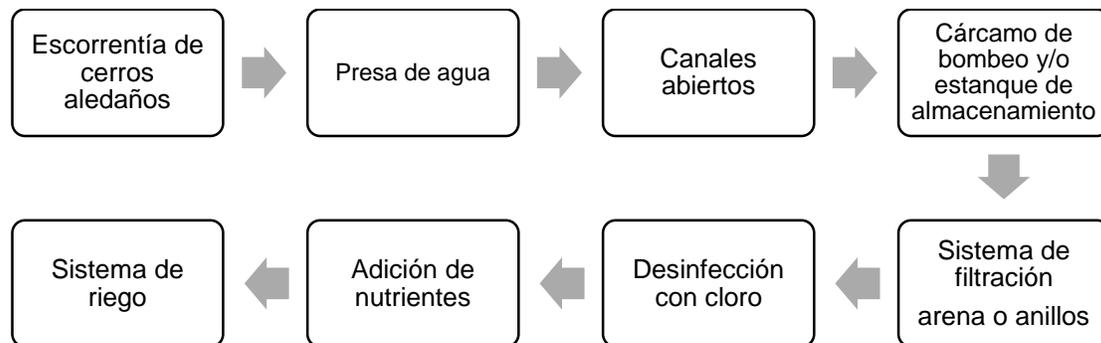


Figura 1. Manejo típico del agua de riego

Bajo este esquema de manejo, se ha podido registrar en el agua la presencia de nemátodos en forma de huevos y larvas. Lo que sugiere que la filtración y en algunos casos, el uso de cloro como desinfectante, no está evitando que estos organismos lleguen a los cultivos. Las concentraciones encontradas en estudios previos ascienden a 30 nemátodos por cada 200 litros de agua (Prado, 2017). Debido a los altos volúmenes de agua empleados, se podrían estar agregando al suelo a través del riego, entre 3000 y 9000 nemátodos/ha/día.

La disminución del rendimiento de los cultivos causada por los nemátodos puede deberse a: 1) no es posible evitar la contaminación a lo largo del sistema, 2) la filtración no resulta efectiva, por el tamaño de los microorganismos y el tamaño de poro del medio filtrante y, 3) el desinfectante aplicado no es capaz de inactivar estos microorganismos. La presencia de nemátodos en el agua de riego puede deberse al agua de escorrentía influenciada por su incidencia en los primeros milímetros de suelo (Villenave et al., 2003), lo que conlleva a una contaminación cruzada entre el suelo y el agua. Sin embargo, referente al Norte de México, no hay datos reportados que justifiquen la contaminación del agua de riego con nemátodos. Asimismo, debido a su tamaño y alta resistencia, los nemátodos pueden pasar los sistemas de filtración y cloración, y emerger vivos en los sistemas de distribución del agua para irrigación.

2.2 NEMÁTODOS

Se conocen como gusanos o helmintos a tres grandes grupos de animales: los gusanos planos (platelmintos), redondos (nemátodos) y de cabeza espinosa (acantocéfalos). Los gusanos redondos o nemátodos (Phylum: Nematoda), se encuentran entre los animales más abundantes de la Tierra. Existen nemátodos bacterívoros, fungívoros, omnívoros, predadores, parásitos de insectos y de plantas (fitoparásitos) (Peregrín, 2013).

2.2.1 MORFOLOGÍA

La palabra nemátodo, proviene de los vocablos griegos *nema* que significa “hilo” y *eidés* u *oidos*, que significan “con aspecto de”, siendo definidos como animales filiformes con cuerpo sin segmentos y más o menos transparentes, cubiertos de una cutícula hialina, la cual está marcada por estrías; son redondeados en sección transversal, con boca, sin extremidades u otros apéndices, muchos son parecidos a lombrices o con forma de anguila. La mayoría de ellos son microscópicos y miden entre 300 y 1000 μm de largo y entre 15 y 35 μm de ancho; su tamaño los hace invisibles a simple vista, pero pueden ser fácilmente observados bajo un microscopio (Guzmán et al., 2012).

2.2.2 CICLO DE VIDA

El ciclo de vida de la mayoría de los nemátodos fitopatógenos es, por lo general, bastante semejante. Los huevecillos se incuban y se desarrollan en larvas, cuya apariencia y estructura es comúnmente similar a la de los nemátodos adultos. En general, presentan seis etapas en su ciclo de vida: huevo, cuatro estadios juveniles y adultos. Los pasos entre estadios juveniles y adulto están separados por mudas (Decraemer and Hunt, 2006). Después de la última muda, los nemátodos se diferencian en hembras y machos adultos.

El ciclo de vida comprendido desde la etapa de huevecillo a otra igual, puede concluir al cabo de tres o cuatro semanas bajo condiciones ambientales óptimas (Tabla 3). En algunas especies de nemátodos, la primera o segunda etapa larvaria no puede infectar a las plantas y sus funciones metabólicas se realizan a expensas de la energía almacenada en el huevecillo. Sin embargo, cuando se forman las etapas infectivas, deben alimentarse de un hospedante susceptible o de lo contrario sufren inanición y mueren. La ausencia de hospedantes apropiados ocasiona la muerte de todos los individuos de ciertas especies de nemátodos al cabo de unos cuantos meses, pero en otras especies, las etapas larvarias pueden desecarse y permanecer en estado de reposo o los huevecillos pueden permanecer en el suelo en un estado de reposo durante varios años (Agrios, 2005).

Tabla 3. Ciclo de vida de los nemátodos

| Estado | Huevo | Estado juvenil | Adulto |
|------------------------|-------|----------------|---------|
| Duración (días) | 3 - 5 | 5 - 10 | 15 - 20 |

Generalmente, la planta es parasitada por el juvenil de segundo estado (J2). Durante el parasitismo, el nemátodo se establece y mantiene una estrecha relación con el hospedante (Figura 2). Los J2 salen de los huevos en los escombros del suelo o de la raíz y migran hacia la punta de la raíz de las plantas candidatas hospedantes. Los J2 son atraídos a la zona de elongación, donde penetran la raíz y luego migran intercelularmente, separando las células por la lámina media en el tejido cortical. Después, se mueven hacia arriba y del centro de la raíz a la zona de diferenciación. Los J2 sufren tres mudas hasta convertirse en adultos.

Las hembras adultas tienen forma de pera y se encuentran casi completamente incrustadas en el tejido del huésped. Después del desarrollo de la hembra, que ocurre usualmente en tres semanas, los huevos son liberados a la superficie de la raíz en una matriz gelatinosa protectora. Los machos adultos son vermiformes y se encuentran libres en la rizósfera o cerca del cuerpo que sobresale de la hembra. Específicamente el ciclo de vida de *M. enterolobii* tarda 4 – 5 semanas en condiciones favorables y las hembras producen alrededor de 400 – 600 huevos (Singh and Phulera, 2015).

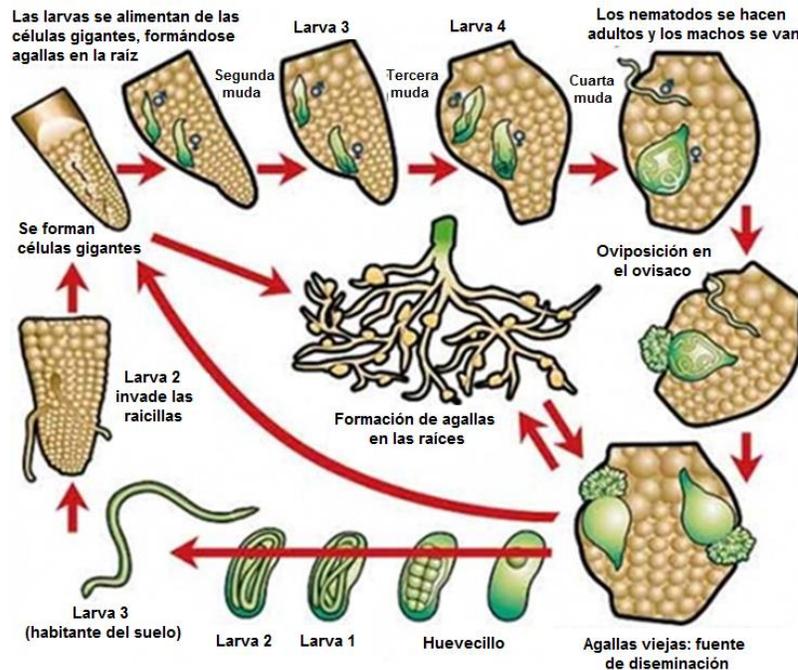


Figura 2. Ciclo de vida del Género *Meloidogyne*
Adaptado de Singh and Phulera, 2015.

El ciclo de desarrollo se ve influenciado por la temperatura del suelo, siendo activos con temperaturas de 25 a 30°C, especialmente en suelos arenosos. Al ser parásitos obligados, el crecimiento de los nemátodos y su reproducción dependen de los sitios de alimentación especializados en la raíz (Arias et al., 2009; OEPP/EPPO, 2014; SENASICA, 2015). Por otra parte, los nemátodos presentan una distribución temporal donde se presentan puntos de máxima densidad poblacional; por ejemplo, la población del nemátodo “agallador” en Sinaloa, se incrementa significativamente a partir del mes de marzo, aspecto que coincide con el aumento de la temperatura en la entidad.

2.2.3 HUEVOS DE NEMÁTODO

De acuerdo con Solís (2009), los huevos están compuestos por tres membranas: a) interna lipídica, compuesta en su mayor parte de ascarósidos (capa lipóide) y pocas proteínas, b) media, quitinosa, se secreta en estímulo a la fertilización y c) externa, vitelina, formada de proteínas tanificadas y mucopolisacáridos (Tabla 4). La capacidad de supervivencia de los huevos depende principalmente del grosor de su cubierta.

En la parte interna del huevo se encuentra el blastómero que, en condiciones óptimas, eclosionan dando origen al primer estadio larval. Los huevos son depositados en una matriz gelatinosa que los mantiene juntos en masas o sacos de huevos. Se han encontrado más de 1,000 huevos en una masa que puede ser más grande que el cuerpo de la hembra. El desarrollo del huevo comienza breves horas después de la ovoposición, resultando en 2, 4, 8, 16 o más células, hasta que se ve una larva completamente formada, con un estilete, enrollada en la membrana del huevo (Taylor and Sasser, 1983).

Se reconocen principalmente dos tipos de huevos, los infértiles o no fecundados y los fértiles o fecundados (Schmidt and Roberts, 1984). Un huevo fértil es considerado también un huevo potencialmente viable, es decir, que tiene la capacidad para desarrollarse hasta la etapa infecciosa. Se considera viabilidad potencial, porque el desarrollo puede verse interrumpido por diferentes causas y no llegar a la etapa infecciosa. En la práctica actual, para determinar si un huevo es viable, es necesario observar su desarrollo embrionario en condiciones naturales, por medio de técnicas de incubación. La incubación *in vitro* consiste en colocar los huevos en un soporte (sólido o líquido) y se incuban bajo condiciones favorables para que los embriones se desarrollen hasta la etapa infectante (Rojas et al., 1998).

Tabla 4. Características de las membranas de la pared de los huevos

| Pared | Composición | Función |
|-----------------------|---|--|
| Capa interna lipídica | Lípidos (75 %): ascarósidos (3,6 dideoxi-L arabinohexosa vinculado a una larga cadena de alcohol (manoles y dioles secundarios que contienen de 22 a 37 átomos de carbono) por un enlace glucosídico) Proteínas (25 %) | Permeabilidad selectiva (evita la penetración de sustancias polares). Cambio con el ambiente (resistencia a la desecación) |
| Capa quitinosa | Microfibras de quitina (un homopolímero de N-acetil-D-glucosamina unido por enlaces β (1→4) dentro de una matriz proteica) | Resistencia estructural |
| Capa vitelina | Lipoproteínas | Adhesión |

Fuente: Solís, 2009.

2.2.4 MELOIDOGYNE

Los nemátodos fitopatógenos pueden clasificarse según el tipo de parasitismo que ejercen sobre sus hospederos. El género *Meloidogyne* se clasifica como endoparásito. El juvenil J2 penetra a la planta y el adulto se mantiene totalmente dentro de ésta, donde se alimenta de células gigantes atrofiadas por la presencia del nemátodo, el cual recibe el nombre de sincitio. Las masas de huevos son liberadas por el rompimiento de la raíz debido a la hiperplasia provocada por el nemátodo. Una vez formado nuevamente el juvenil J2 dentro del huevo, las formas juveniles eclosionan y pueden reinfectar raíces de la misma planta o de plantas cercanas (Singh and Phulera, 2015).



Figura 3. Agallamiento radical en plantas de tomate inducido por *M. enterolobii*

Meloidogyne spp., es una de las plagas económicamente más importantes debido a las grandes pérdidas que causa a cultivos hortícolas, cereales, frutales y ornamentales (Adams et al., 2009).

Dentro de este género han sido descritas más de ochenta especies (Subbotin and Moens, 2006). Las principales son: *M. incognita* (capaz de reproducirse en más de 2000 especies de plantas), *M. arenaria*, *M. hapla*, y *M. javanica* y, suponen el 95% de todas las citas de enfermedades causadas por nemátodos formadores de agallas en las raíces. En México, estas cuatro especies son las más comunes (Cid et al., 2001). Sin embargo, actualmente *M. enterolobii* ha cobrado importancia a nivel mundial por su agresividad (capacidad del nemátodo para invadir y reproducirse en un huésped adecuado), distribución geográfica creciente y amplio intervalo de hospederos (Castagnone, 2012).

El intervalo de hospedantes de *M. enterolobii* incluye varias especies de plantas de cultivo de importancia económica como pimienta, tomate, soya, guayaba, café, frijoles, sandía y papa, entre otros (Moens et al., 2009). Esta especie tiene la capacidad de establecerse exitosamente en genotipos de plantas portadoras de genes dominantes que confieren resistencia a las tres especies principales de RKN en tomate (Mi-1), papa (Mh), soya (Mir1) y pimienta (N y Tabasco) (Castagnone, 2012). *M. enterolobii* fue descrita por primera vez por Yang y Eisenback (1983) en China afectando raíces de árboles de pacará (*Enterolobium contortisiliquum*).

A nivel mundial, *M. enterolobii* ha sido reportada en África (Burkina Faso, Costa de Marfil, Malawi, Senegal, Sudáfrica, Togo), Asia (China, Vietnam), Estados Unidos (Florida), América Central y el Caribe (Cuba, Guatemala, Martinica, Guadalupe, Puerto Rico, Trinidad y Tobago) y en Sudamérica (Brasil y Venezuela) (OEPP/EPPO, 2014). Recientemente se informó por primera vez en México que parasitaba la sandía (Veracruz; Ramírez et al., 2014) y plantas de tomate (Sinaloa; Martínez et al., 2015).

M. enterolobii al alimentarse de los tejidos de la raíz ocasiona deformaciones por hiperplasia e hipertrofia de las células (Figura 3). Estas deformaciones son llamadas agallas. Los síntomas son muy variados y dependen en gran medida de los niveles poblacionales en las raíces. Las plantas infestadas muestran un desarrollo distorsionado del sistema radical caracterizado por

la formación de agallas. Las agallas pueden medir desde 1 o 2 milímetros de diámetro en las raíces pequeñas y hasta 1 cm o más en las raíces grandes. Las raíces altamente infestadas son mucho más cortas que las sanas, tienen menos raíces laterales y pelos radicales (Williamson and Hussey, 1996).

En cuanto al sistema aéreo, los síntomas de una planta infestada por *Meloidogyne* son similares a los que presenta una planta con otro tipo de daño en las raíces. Estos pueden ser: inhibición de la brotación, disminución del crecimiento y deficiencias nutricionales. Estas últimas se manifiestan como clorosis del follaje, ya que los nemátodos interfieren en la producción y translocación de sustancias provenientes de las raíces, como las hormonas giberelinas y citoquininas, y también de sustancias que regulan la fotosíntesis. Otro síntoma característico es la aparición de marchitez temporal a pesar de haber humedad adecuada en el suelo, debido al menor tamaño del sistema radical y a que los elementos vasculares en los nódulos se rompen y se deforman, interrumpiendo mecánicamente el flujo normal de agua y nutrientes (Arias et al., 2009). Como resultado, aparecen síntomas de deficiencia de nutrimentos, los cuales conllevan a la disminución de los rendimientos.

2.2.5 AFECTACIONES EN MÉXICO POR *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII*

CULTIVO DE TOMATE

En Sinaloa (Estado consolidado como principal productor de tomate en el país), durante los últimos diez años, se ha observado la presencia de agallas radiculares en diferentes híbridos comerciales de tomate. Sin embargo, durante el ciclo hortícola 2012 – 2013 se observó el daño de agallamiento por *M. enterolobii* a cultivos de tomate resistentes a *M. incognita*, *M. javanica* y *M. arenaria* (Martínez et al., 2015). La importancia de los bajos rendimientos en los cultivos de tomate radica en que, de acuerdo con la FAO, México es uno de los principales exportadores a nivel mundial de tomate. Según las estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), durante 2016 la producción anual de tomate fue de alrededor de 3.3 millones de toneladas (Tabla 5), en tanto que datos del Sistema Producto indican que las exportaciones ascendieron a más de 20 mil mdp.

Tabla 5. Producción nacional de tomate en México en 2016

| Superficie Sembrada (Ha) | Superficie Cosechada (Ha) | Producción (Ton) | Rendimiento (Ton/Ha) | PMR (\$/Ton) | Valor producción (Miles de pesos) |
|--------------------------|---------------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|
| 51,861 | 51,299 | 3,349,154 | 65 | 7,127 | 23,871,404 |

Fuente: SIAP, 2016.

OTROS CULTIVOS

El primer reporte que se tiene de *M. enterolobii* en México es con la infección de cultivos de sandía *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum & Nakai, 1916 cv. *Sunsugar* en el Estado de Veracruz (Ramírez et al., 2014). En 2012, el daño fue tan grave que los productores tuvieron que cambiar a una cosecha diferente. Las plantas mostraron amarillamiento, retraso en el crecimiento y altos niveles de infección expresados por extensas irritaciones en las raíces. En 2015 en Jalisco, las plantas de *Stenocereus queretaroensis* (pitaya) exhibieron los mismos

síntomas que los cultivos de sandía infectados, así como una reducción en el número de fruta, y en algunos casos la muerte de las plantas (Ramírez et al., 2016). Otro cultivo infectado por *M. enterolobii*, en Sinaloa, fue el de chile jalapeño (Villar et al., 2016). En cada uno de estos estudios, se identificó a *M. enterolobii* como el responsable de estos daños mediante análisis morfológicos y moleculares.

2.3 NEMÁTODOS FITOPARÁSITOS EN AGUA DE RIEGO

Los principales géneros de nemátodos fitoparásitos (económicamente importantes), han sido reportados en estudios donde se muestreo agua de los canales de riego, ríos, embalses, aguas de escorrentía de los campos agrícolas y de agua municipal, así como en las aguas de drenaje de los sistemas hidropónicos en todo el mundo (Hugo and Malan, 2010). En la Tabla 6 se indican los registros del nemátodo *Meloidogyne* encontrado en diferentes fuentes de agua de riego.

Tabla 6. *Meloidogyne* en agua de riego

| Especie | Fuente de agua | Lugar |
|------------------------------|--|--|
| <i>Meloidogyne incognita</i> | El agua de drenaje (cultivo sin suelo) | Bélgica |
| <i>Meloidogyne arenaria</i> | El agua de drenaje (cultivo sin suelo) | Italia |
| <i>Meloidogyne</i> spp. | Canal, presa, agua municipal, río, escorrentía | Australia (Victoria); Sudáfrica (Mpumalanga; Western Cape); EE.UU. (Georgia; Washington) |

Fuente: Hugo and Malan (2010).

La presencia de nemátodos en agua potable fue reportada por Tombes et al. (1978). Godfrey (1923) fue el primero para destacar la posibilidad de que los nemátodos fitoparásitos se dispersan a través del agua de riego. Una investigación pionera por Faulkner y Bolander (1970) mostró que entre 10 y 20% de la población total de nemátodos en un canal principal de riego en Washington eran fitoparásitos y con ello expresó el potencial para la difusión de estos parásitos a través del agua de riego.

A pesar de que los nemátodos fitoparásitos viven en una película de agua alrededor de las partículas del suelo, no están adaptados a un ambiente acuático. Como el agua no es su hábitat natural, la fuente de agua probablemente esté libre de nemátodos, sin embargo, pueden entrar al sistema de riego de diferentes maneras a lo largo de la distribución y el agua de riego puede contaminarse de manera accidental. Antes de considerar cualquier método de tratamiento de agua, se deben tomar todas las medidas posibles para evitar, inicialmente, que la fuente de agua se contamine con nemátodos fitoparásitos. Solamente, cuando falta una fuente de agua limpia, o no se puede impedir que los nemátodos entren en el sistema de riego, deben considerarse métodos de tratamiento.

2.3.1 RESISTENCIA DE LOS NEMÁTODOS A LA DESINFECCIÓN

Se ha demostrado que los microorganismos tienen una variedad de mecanismos intrínsecos y adquiridos de resistencia a los biocidas químicos. En general, el mundo microbiano puede clasificarse generalmente basado en su resistencia conocida o estimada a los procesos físicos y químicos.

El siguiente sistema de clasificación (Figura 4), sin embargo, sólo puede usarse como guía, ya que los perfiles de resistencia microbiana varían dependiendo del proceso biocida o antimicrobiano (McDonnell, 2007). Además, hay muchas excepciones a este perfil y no contempla las diversas características de crecimiento y supervivencia ambiental que presentan los microorganismos en sus diversos hábitats, que son importantes consideraciones en su control. Los mecanismos intrínsecos básicos de resistencia se deben particularmente a las estructuras superficiales que pueden proteger a los microorganismos de los biocidas (Manivannan, 2008).

De acuerdo a esta clasificación, los huevos de nemátodos se encuentran en el tercer lugar de los organismos más resistentes después de los ooquistes de protozoarios y esporas bacterianas. Datos disponibles sugieren que los ooquistes de *Cryptosporidium* son de los más resistentes al ozono, el cual es considerado como uno de los biocidas más efectivos (Clark et al., 1993).

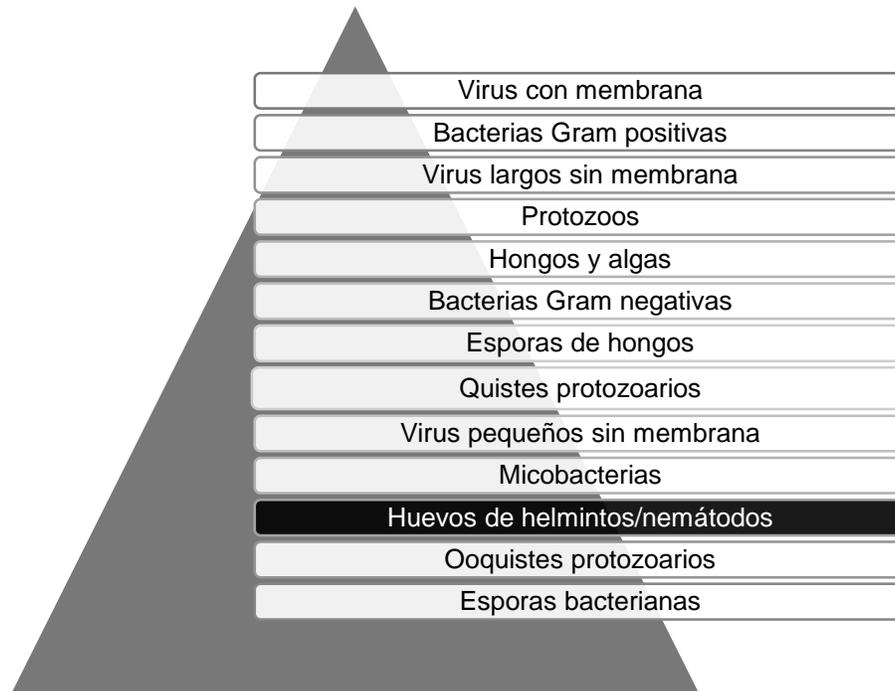


Figura 4. Resistencia microbiana a los biocidas

Esta lista muestra los microorganismos que son generalmente menos resistentes a los biocidas (desde la parte superior) y los de mayor resistencia (en la parte inferior). Este perfil puede variar dependiendo del biocida (McDonnell, 2007).

2.4 MEDIDAS DE CONTROL EN EL SUELO

El manejo efectivo de nemátodos parásitos en el suelo incluye métodos de control físico (e.g. solarización del suelo), químico y biológico (Kosma et al., 2011). Asimismo, estudios han reportado que los materiales que contienen nitrógeno, orgánico o inorgánico que pueden liberar NH_4^+ , se han utilizado para eliminar los nemátodos agalladores (Bashour et al., 2013).

La solarización consiste en el calentamiento del suelo a temperaturas tales que se produzca un control físico de los patógenos (Castillo et al., 2004). Esta técnica se practica cubriendo el suelo agrícola finamente labrado y humectado con una película de plástico transparente a la radiación solar incidente e impermeable a la radiación reflejada. Sin embargo, fitoparásitos como *Meloidogyne* spp., se han referido como parcialmente termotolerantes y difíciles de erradicar mediante este método. Asimismo, la matriz gelatinosa en la que se encuentran las masas de huevos de *Meloidogyne*, que previene a estos de la desecación, constituye una protección adicional frente a la inactivación térmica por temperaturas elevadas (Orion, 1995).

Los nematicidas químicos usados por los agricultores para el control de nemátodos parásitos de las plantas son muy efectivos al reducir drásticamente parte de la población de los nemátodos. Algunos productores aplican los productos al suelo antes o al momento de la siembra para evitar tener pérdidas cuantiosas. La aplicación de nematicidas al suelo es conocida como “tratamiento del suelo” (Taylor and Sasser, 1983). Nematicidas como fenamifos, carbofurano, temik, oxamil, rugby, mocap y vapam, son capaces de lograr una considerable reducción de la población de nemátodos, número de agallas y masas de huevos (Soltani et al., 2013). Sin embargo, el uso constante de compuestos químicos perturba el equilibrio del ecosistema y son altamente tóxicos para las personas; además, pueden provocar el desarrollo de cepas resistentes en el organismo del objetivo (Naseby, 2000).

Por su parte, el control biológico implica el uso de organismos benéficos, de sus genes o productos (metabolitos), que reducen los efectos negativos de los patógenos y promueven respuestas positivas de la planta (Junaid et al., 2013). Los hongos nematófagos tienen una acción antagonista contra los nemátodos (e.g. *Arthrobotrys oligospora*, *A. superba*, *A. anchonia*, *A. dactyloides*, *Dactylaria brochopaga*) (Tranier et al., 2014). El proceso de infección comienza con la penetración de la cutícula, inmovilización, invasión y, termina con la digestión del nemátodo (Huang et al., 2004). Existen también hongos con capacidad de infectar y destruir los huevos de nemátodos. Los hongos parásitos del huevo incluyen los géneros *Paecilomyces*, *Pochonia* y *Verticillium* (Van Damme, et al., 2005). Se ha demostrado que *P. lilacinus* controla con éxito los nemátodos agalladores, *M. javanica* y *M. incognita* en cultivos de tomate, berenjena y otros vegetales (Goswami and Mittal, 2004). No obstante, la eficiencia del biocontrol está influenciada por factores abióticos y bióticos (Junaid et al., 2013).

2.5 DESINFECCIÓN CON OZONO

El ozono (O_3) es una molécula, con tres átomos de oxígeno, muy inestable y reactiva. En 1857, fue diseñado el primer generador; en 1893, el primer tratamiento de agua potable con ozono fue realizado en Holanda y, en 1906, se usó por primera vez en una planta de tratamiento de agua, en Niza, Francia. En la actualidad, se utiliza para muchos tratamientos de agua alrededor del mundo.

El ozono es un alótropo del oxígeno, a temperatura y presión ambiente es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a la molécula de oxígeno (O_2). Debido a esta característica no puede almacenarse, debe generarse *in situ* y usarse inmediatamente. La ozonización se utiliza generalmente cuando es necesario un elevado potencial oxidante, para oxidar compuestos orgánicos que imparten color, sabor u olor desagradables al agua y, al mismo tiempo, inactivar microorganismos patógenos (Solsona y Méndez, 2002).

La desinfección con esta alternativa tecnológica dosifica cantidades suficientes de gas ozono, de manera que se satisfaga la demanda inmediata del agua y se mantenga una concentración residual durante un tiempo de contacto que asegure la inactivación total de los microorganismos patógenos; lo anterior, cuando se trata de un agua para consumo humano. En el caso de aguas residuales, con la dosificación de ozono sólo se busca alcanzar un nivel de desactivación logarítmica deseado con base en el tipo de reúso o destino final del efluente de tratamiento.

Bajo condiciones controladas de laboratorio, concentraciones residuales de 0.4 mg O_3 /L mantenidas durante 4 min, son suficientes para garantizar la inocuidad del agua. En el caso de agua potable, en los procesos de desinfección por ozono, normalmente se trata de mantener una concentración residual de 0.4 a 0.5 mg O_3 /L durante 10 a 20 minutos de tiempo de contacto con el agua (Lage, 2010; Lawrence and Cappelli, 1977).

La acción germicida del ozono se debe fundamentalmente a los radicales activos que reaccionan con diversos componentes orgánicos de las células animales, vegetales y de microorganismos; puede romper la membrana celular y así imposibilitar la reactivación de las células de bacterias, virus y protozoarios. Dichos mecanismos se basan en el alto potencial de oxidación que tienen las disoluciones de ozono. Esta condición convierte al ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual de efectivo para atacar esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos. Por esta razón, el ozono se utiliza mayoritariamente para la desinfección del agua potable y la desinfección del procesamiento de alimentos (Langlais et al., 1991; Solsona y Méndez, 2002).

La inactivación microbiana con ozono depende de varios factores ambientales. La temperatura afecta a la solubilidad, estabilidad y reactividad del ozono. Por otro lado, la humedad relativa, el pH, la presencia de ciertos aditivos, el tiempo de contacto, el tipo de organismo, la dosificación, la turbidez, la presencia de materia orgánica y la demanda de ozono afectan tanto su actividad como la eficiencia (Voidarou et al., 2007; Martínez et al., 2011). Por lo antes mencionado, es necesario determinar la dosis requerida en cada caso.

La dosis de ozono necesaria para reducir eficazmente los patógenos está principalmente relacionada con la cantidad de organismos en el influente y el nivel de desinfección deseado. Algunos autores han informado y establecido dosis adecuadas de ozono que van de 5 a 15 mgO₃/L (Lazarova et al., 1998). En la práctica, se recomienda una tasa de tratamiento de ozono que oscile entre 10 y 30 mgO₃/L para una desinfección óptima de agua residual tratada para riego agrícola (Xu et al., 2002; Martínez et al., 2011). El ozono residual es el ozono remanente que queda en el agua después de la ozonización y asegura una dosis suficiente para un tratamiento satisfactorio. Un contenido de ozono residual de 0.4 mgO₃/L asegura una desinfección adecuada del agua (Langlais, 1988).

El ozono es uno de los desinfectantes más fuertes disponibles en el tratamiento de agua potable y prácticamente todos los estándares y valores de inactivación de ciertos microorganismos patógenos, que se encuentran en la literatura, están referidos a este tipo de agua. Para ello se utilizan comúnmente los valores de “CT” (el producto de la concentración de ozono residual (C) y el tiempo de contacto (T)), como una medida de las condiciones necesarias para desinfectar e inactivar microorganismos. Es normal encontrar reportados valores de CT para diferentes tipos de indicadores, los cuales son utilizados como criterios de diseño de los procesos de desinfección con ozono. En caso particular de este estudio, se decidió tomar como referencia el valor de CT como una medida de comparación de las condiciones de tratamiento de la aplicación del ozono en el agua de riego, el cual ha sido reportado en estudios de inactivación de otras especies de nemátodos.

2.5.1 CONCEPTO CT

A principios de la década de los setenta, el criterio de la inactivación del virus de la poliomielitis (Coin et al., 1967) fue seleccionado como base para la desinfección con ozono y adoptado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Bataller et al., 2010). Se indicó entonces que una concentración de ozono residual disuelto de 0.4 mg/L mantenida durante 4 minutos, era suficiente para inactivar más de 99.99 % de este virus (U.S. EPA, 1989b). Este criterio de diseño llamado “virucida”, junto al concepto de “ozonización verdadera” (Block, 1977), que tiene en cuenta la demanda de ozono en el agua, se convirtió en la base de diseño de la práctica internacional. En este sentido, se propuso el empleo de dos cámaras de contacto como mínimo y la aplicación de cantidades proporcionales de ozono para mantener 0.4 mg/L por 4 minutos en plantas potabilizadoras (Richard, 1985).

A diferencia del cloro, la capacidad desinfectante del ozono no depende tanto de su período de retención en el agua, sino de la dosis suministrada (en la fórmula $C \times T$ prima entonces el valor de “C”). Esto se debe a que su alto potencial oxidante produce gran inestabilidad del ozono, incluso en el agua destilada, lo que quiere decir que quedará ozono remanente y por un corto tiempo solo cuando toda la materia con alta capacidad de oxidación haya sido oxidada. En caso contrario, es posible que no se haya satisfecho completamente la demanda de ozono. Dada su escasa permanencia, es importante determinar adecuadamente la demanda de ozono y el residual que asegure una desinfección completa.

Otro criterio para el diseño de reactores fue introducido por la U.S. EPA (1989a) con una nueva regulación para la desinfección de aguas superficiales denominada Surface Water Treatment Rule (SWTR), en lo referente a nuevos microorganismos a tener en cuenta en la calidad del agua de consumo, como enterovirus, *Legionella*¹ y los quistes de *Giardia*². Este criterio corresponde con el llamado concepto CT y constituye una guía de esta regulación, que especifica la concentración de ozono disuelto (C, mg/L) y el tiempo de contacto efectivo (T, min) para cada microorganismo encontrado en la mayoría de las plantas de tratamiento.

Algunos estudios que tienen en cuenta los valores de CT demuestran que el ozono es el desinfectante más efectivo respecto a otras alternativas y se resumen en Tabla 7. En ésta se muestran valores de CT para diferentes microorganismos y los desinfectantes usados; y puede observarse que el ozono presenta valores de CT menores incluso para la inactivación de quistes de protozoos. Liyanage et al. (1997), en un estudio sobre la inactivación de *Giardia* y *Cryptosporidium*³, resaltan la ozonización como la alternativa más eficiente respecto a otros desinfectantes, lo anterior fue de gran importancia debido a los intensos brotes de estos patógenos que acontecieron en EUA y Canadá (Larocque, 1999).

Tabla 7. Inactivación con ozono del 99% de los microorganismos

| Microorganismo | CT (concentración, mg/L x tiempo, min) | | | |
|-------------------------------|--|------------------------|------------------------------|-------------------|
| | Cloro libre (pH 6-7) | Cloraminas (pH 8-9) | Dióxido de cloro (pH 6-7) | Ozono (pH 6-7) |
| <i>E. coli</i> | 0.034 – 0.05 | 95 - 180 | 0.4 – 0.75 | 0.02 |
| <i>Polio virus</i> | 1.1 – 2.5 | 770 - 3740 | 0.2 – 6.7 | 0.1 – 0.2 |
| <i>Giardia lamblia</i> quiste | 47 - 150 | - | - | 0.5 – 0.6 |
| <i>Giardia muris</i> quiste | 30 - 630 | - | 7.2 – 18.5 | 1.8 – 2.0 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | 7200 | 7200 | 78 | 5 - 10 |

Fuente: Clark et al., 1993.

Finch (2001) realizó una extensa valoración sobre la inactivación de *Cryptosporidium* con ozono durante la potabilización. Sus resultados destacan la importancia de considerar la calidad o naturaleza del agua, el uso correcto de los modelos cinéticos y la temperatura del agua. Por otro lado, Haas et al. (1994) mostraron que la inactivación con ozono de *Giardia* puede obtenerse con condiciones por debajo de los valores de CT reportados. En este sentido, se conoce que los valores de CT de la SWTR son multiplicados por un factor de seguridad, dependiendo del grado de incertidumbre de los datos. Por ejemplo, para *Giardia* los valores que se reportan se basaron en estudios realizados por Wickramanayake (1984 y 1988), donde empleó agua con disolución reguladora de pH, y se les aplicó un factor de dos (Finch 2001).

¹ *Legionella* es una bacteria Gram negativa. *L. pneumophila* provoca neumonías en los humanos. Se transmite a través de aerosoles que contienen la bacteria. Las fuentes comunes incluyen torres de enfriamiento y sistemas de agua caliente, estanques de agua dulce y arroyos. Se han producido brotes de legionelosis en o cerca de hoteles, hospitales, oficinas y fábricas (Ruiz et al., 2007). ² *Giardia* es un protozoo flagelado, que se desprende durante su etapa de quiste con las heces del hombre y los animales. *Giardia lamblia* causa una enfermedad gastrointestinal grave llamada giardiasis (Bing-Mu and Hsuan-Hsien, 2003; Karanis, 2011). ³ *Cryptosporidium* es un protozoo ampliamente encontrado en fuentes de agua superficiales y se disemina por la ruta fecal-oral como un oocisto inactivo de las heces de humanos y animales. En su etapa inactiva, está alojado en una forma de oocistos de cáscara dura que es resistente al cloro y a los desinfectantes de cloramina. Cuando se ingiere agua que contiene estos oocistos, el protozoo puede causar criptosporidiosis (Bing-Mu and Hsuan-Hsien, 2003; Karanis, 2011).

2.5.2 MECANISMOS DE DESINFECCIÓN

En 1976, Hoigné y Bader describieron la reacción del ozono en solución acuosa frente a otros compuestos de dos maneras: a) por oxidación directa de ozono molecular, y b) por oxidación indirecta mediante las especies formadas por la descomposición del ozono en el agua (radicales libres). El pH influye en estas reacciones. El ozono reacciona predominantemente de forma molecular a pH ácido, mientras que el pH alcalino genera la formación de radicales OH⁻. El ozono molecular reacciona de forma selectiva, mientras que la acción de los radicales es no selectiva, pero es más rápida.

El ozono puede reaccionar directamente con los sustratos (S) o, por encima de un valor de pH crítico, descomponerse antes de la reacción con los sustratos. Más allá de este valor crítico de pH, los productos de descomposición de O₃ tales como los radicales hidroxilo (OH⁻) se convierten en oxidantes importantes. El valor de pH crítico por encima del cual predomina el segundo tipo de reacción depende tanto de la velocidad con la que el O₃ reacciona directamente con los sustratos como de los solutos, incluidos los productos de reacción, que potencian o retardan la descomposición de O₃ (S') (Figura 5).

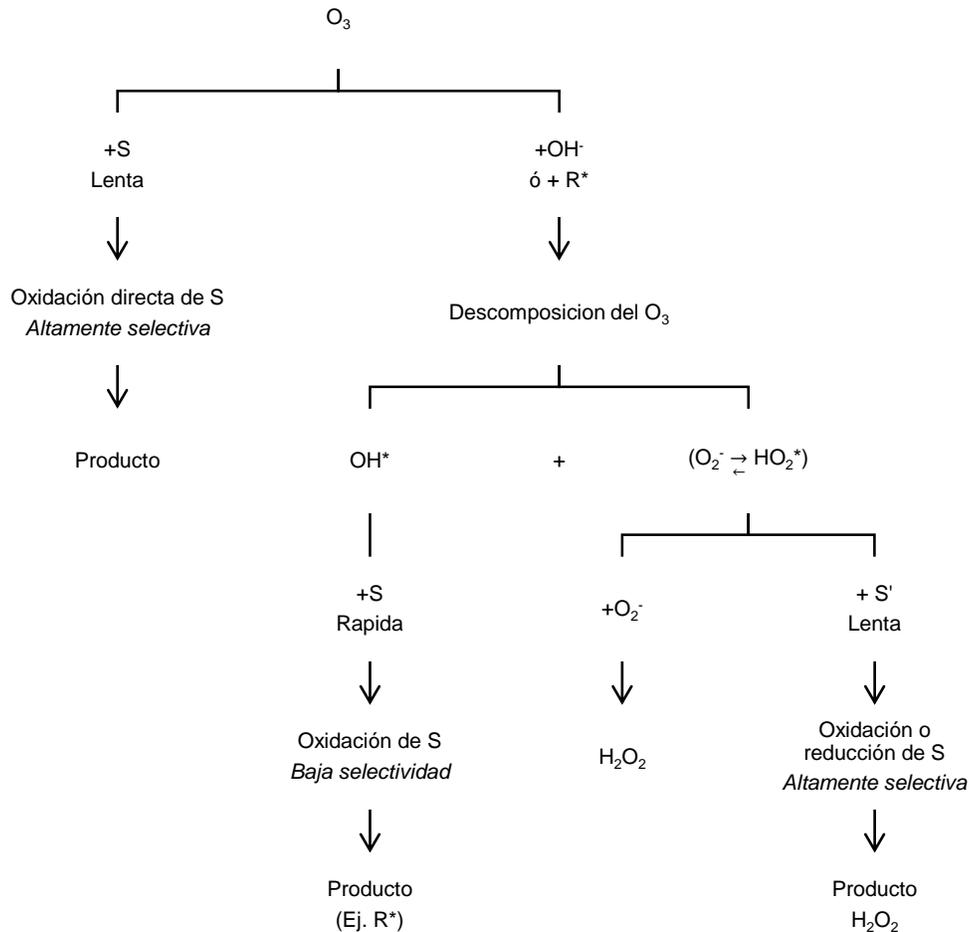


Figura 5. Descomposición del ozono en solución acuosa
Fuente: Hoigné and Bader, 1976.

La reacción directa del ozono es a menudo selectiva hacia compuestos específicos y grupos funcionales. La estructura dipolar del ozono da lugar a la ciclo-adición a enlaces insaturados, mecanismo de Criegee, formando ozónidos. El ozono también es un electrófilo fuerte y reacciona rápidamente con compuestos orgánicos e inorgánicos a través de una reacción de transferencia de átomos de oxígeno. La reactividad se mejora por grupos donantes de electrones y disminuidos por electrones. En el caso de los grupos de arrastre de electrones, el ozono actúa como un nucleófilo (Lage, 2010).

En la reacción indirecta por especies reactivas, los componentes que se encuentren en la solución afectarán la tasa de descomposición del ozono. Éstos pueden actuar de cuatro maneras diferentes como iniciadores, promotores, inhibidores e inhibidores con la reformación de ozono (Langlais et al., 1991). Los iniciadores son compuestos que forman el anión superóxido O_2^- a partir de una molécula de ozono. Ejemplos de ellos son OH^- , HO_2^- y compuestos orgánicos, como ácidos fórmicos y sustancias húmicas. Además, la radiación UV a 254 nm puede usarse para la activación de las reacciones en cadena del ozono. Esto se usa en el tratamiento del agua, ya que algunos compuestos orgánicos, por ejemplo, moléculas alifáticas saturadas, solo se degradan por radicales OH^- .

Los promotores son compuestos que regeneran O_2^- del radical hidroxilo. La velocidad de reacción entre el ozono y el anión superóxido es alta, $k = 1.6 \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$, en comparación con muchas otras reacciones de ozono. La presencia de O_2^- promoverá la descomposición del ozono. Ejemplos de promotores son el propio ozono, compuestos con grupos arilo, alcoholes primarios y ácidos húmicos (Langlais et al., 1991).

Los inhibidores son compuestos, captadores de radicales, que consumen radicales OH^- sin regeneración de O_2^- , y así retardan la descomposición del ozono. Algunos inhibidores comunes son alcoholes terciarios, compuestos con grupos alquilo y ácido acético. El bicarbonato y carbonato pueden inhibir por completo la reacción en cadena de los radicales e incluso volver a formar ozono. El bicarbonato se utiliza en muchas reacciones selectivas del ozono. Otro efecto positivo es, por lo tanto, la capacidad tampón del carbonato. Si hay otros iones presentes, los iones de carbonato pueden evitar un aumento de la alcalinidad, donde los iones OH^- se producen en la reacción total (Langlais et al., 1991).

En fase acuosa, el ozono reacciona con los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. La mayoría de las reacciones que involucran compuestos inorgánicos ocurren de manera muy rápida, excepto las que involucran la formación de bromato. Las reacciones con productos orgánicos pueden ser muy rápidas, esto depende de las moléculas orgánicas involucradas y del pH (Lage, 2010).

Las reacciones de oxidación avanzada con radicales OH^- son necesarias para remover contaminantes específicos difíciles de oxidar, como solventes, la mayoría de los plaguicidas y compuestos que generan olores y sabores en el agua como producto del crecimiento y descomposición de algas (Domènech et al., 2001). Es importante notar que la oxidación de materia orgánica mediante ozono puede cambiar su composición en términos de carbono orgánico total (COT), disminuyendo la materia orgánica hidrofóbica y aumentando la materia

orgánica hidrofílica. Lo anterior se debe a que el ozono actúa sobre los compuestos hidrofóbicos para formar compuestos intermedios de ozonización correspondientes a compuestos de naturaleza hidrofílica (Muñoz y Orta, 2012).

Cuando hay presencia de material orgánico, la química se hace más compleja y se acelera la descomposición del ozono. Con un potencial de oxidación de 2.07 voltios, el ozono teóricamente puede oxidar la mayoría de los compuestos orgánicos y los convierte en dióxido de carbono y agua, pero como es selectivo en cuanto a las sustancias que oxida rápidamente, la cinética de las reacciones del ozono con muchos compuestos será demasiado lenta para que resulte en la conversión de éstos a dióxido de carbono durante el tratamiento del agua (Wang et al., 2007). En el tratamiento de sustancias orgánicas, el ozono se ha usado principalmente para la ruptura de enlaces múltiples como tratamiento preliminar, antes de la filtración y como ayuda para la coagulación.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta, al igual que con otros desinfectantes, es que la eficacia del ozono depende de su contacto con los microorganismos, por lo que, en la medida de lo posible, debe evitarse que éstos se agrupen y protejan (en caso de que el agua presente turbiedad) y también se debe proveer algún sistema de mezcla o contacto con el ozono antes que el gas se disipe (Lage, 2010).

2.5.3 DESCOMPOSICIÓN DEL OZONO EN EL AGUA

Hoigné (1994) señala que los parámetros que pueden ejercer una influencia significativa sobre la cinética de decaimiento del ozono en el agua incluyen la temperatura, dureza, pH, alcalinidad, absorbancia UV (254 nm), concentración de metales, concentración de aniones / cationes y contenido sólido (o material particulado). Variaciones en esos parámetros pueden influir en la descomposición del ozono (Gardoni et al., 2012). A continuación, se enfatizará sobre la materia orgánica, alcalinidad y temperatura.

MATERIA ORGÁNICA

El ozono, una vez disuelto en el agua, reacciona con una gran cantidad de componentes orgánicos de dos formas diferentes: por oxidación directa con ozono molecular o por una reacción indirecta mediante la formación de oxidantes secundarios como radicales hidroxilos (Hoigné and Bader, 1976). El ozono oxida mayoritariamente las moléculas que contienen dobles enlaces carbono-carbono y alcoholes aromáticos. Puede romper la estructura de la materia orgánica natural y propiciar la transformación de los compuestos de alto peso molecular en otros de bajo peso como ácidos carboxílicos, carbohidratos y aminoácidos (Wang et al., 2007).

La materia orgánica disuelta (MOD) en agua superficial es una mezcla compleja de compuestos con estructuras aromáticas y alifáticas que incluyen amidas, carboxilos, hidroxilos, cetonas y otros grupos funcionales. Las fracciones de la MOD que se pueden encontrar en las aguas se dividen en dos grandes grupos: hidrofóbica e hidrofílica (Imai et al., 2002). La MOD de diferentes orígenes muestra compuestos representativos tales como ácidos húmicos y fúlvicos, hidrocarburos / taninos, aminas aromáticas, ácidos poliurónicos, azúcares, péptidos /

aminoácidos (Tabla 8; Cerón, 2016). La fracción más abundante encontrada en las aguas superficiales es la fracción hidrofóbica ácida (HPOA), que consta de los ácidos fúlvicos (AF) y húmicos (AH), con concentraciones entre 5 – 6 mg COD/L.

Tabla 8. Composición porcentual promedio de las fracciones de la MOD en agua superficial

| MOD | Fracción | Compuesto modelo | Composición (%) | Concentración (mg/L) |
|----------------------|----------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Hidrofóbica (HPO) | Ácida | Sustancias húmicas | 47 | 2.82 |
| | Neutra | Ácido gálico | 3.7 | 0.222 |
| | Básica | Anilina | 2 | 0.12 |
| Hidrofílica (HPI) | Ácida | Ácido cítrico | 16.3 | 0.978 |
| | Neutra | Polisucrosa | 28 | 1.68 |
| | Básica | Glutatión | 3 | 0.18 |

Fuente: Cerón, 2016

Tabla 9. Análisis químico de agua superficial*

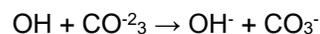
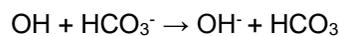
| Parámetro | Concentración (mg/L) |
|-------------------------------------|----------------------|
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) | <1.00 |
| Alcalinidad como CaCO ₃ | 112.40 |
| Carbono orgánico total (COT) | 7.0 |
| Nitrato como N | 0.70 |
| Sulfato | 24.0 |
| Fosfato total como P | 0.02 |
| Calcio | 24.85 |
| Magnesio | 12.22 |
| Hierro | 0.17 |
| Sodio | 13.94 |
| pH | 5.5 – 8.5 |

Fuente: Alrousan et al., 2009. *Obtenida de la Cuenca de Dorisland.

Los compuestos orgánicos presentes en el agua superficial afectan significativamente los procesos desinfección (Alrousan et al., 2009). En estudios de desinfección fotocatalítica con TiO₂ (Rincón and Pulgarin, 2004; Alrousan et al., 2009) se han utilizado solamente ácidos húmicos como el equivalente al carbón orgánico total (COT) que pudieran tener el agua superficial real (Tabla 9). Por su parte, Nghiem et al. (2004), reportaron un COT de 10 mg/L en un efluente secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales.

ALCALINIDAD

La alcalinidad de muchas aguas superficiales depende primordialmente del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que suele tomarse como una indicación de la concentración de estos componentes. Los valores determinados pueden incluir también la contribución de boratos, fosfatos, silicatos y otras bases, cuando estén presentes (Pérez et al., 2013). El bicarbonato y el carbonato retardan la descomposición del ozono reaccionando con el radical hidroxilo.



Los radicales bicarbonato y carbonato (HCO_3 y CO_3) son intermediarios relativamente poco reactivos que no pueden propagar la cadena, es decir, pueden inhibir por completo la reacción en cadena de los radicales e incluso volver a formar ozono. Así, el agua con mayor alcalinidad de bicarbonato y carbonato retendrá un residual de ozono por periodos más largos de tiempo que el agua de baja alcalinidad (Elovitz, et al., 2008).

De acuerdo con Kevein (1989), en general, los rangos de alcalinidad de las aguas superficiales son: baja, menor a 75, media, entre 75 y 150, y alta, mayor a 150 mgCaCO_3/L . La alcalinidad que se ha encontrado en el agua utilizada para riego en el norte del país en época de estiaje es de 53 mgCaCO_3/L , mientras que en época de lluvias es de 42 mgCaCO_3/L (datos no publicados). Alrousan et al. (2009) reportaron un valor de alcalinidad de agua superficial de 112 mgCaCO_3/L .

TEMPERATURA

La temperatura también puede afectar la química del ozono a través de la velocidad de reacción (Jung, 2017). El ozono es solo parcialmente soluble en agua, y como sucede con la mayoría de los gases, su solubilidad aumenta a medida que la temperatura disminuye o la mezcla se presuriza (Ley de Henry). Por ello, la descomposición del ozono es más rápida a temperaturas más altas que a temperaturas bajas (Egorova et al., 2015).

La temperatura del agua superficial varía según la estación y la ubicación geográfica, con un promedio bajo de -1°C en las regiones polares y un promedio alto de 30°C cerca del ecuador (Reynolds and Smith, 1995). Este amplio intervalo de temperatura afecta la capacidad de desinfección del ozono del agua superficial. Debido a que la solubilidad del ozono en agua es afectada por la temperatura, a valores elevados de ésta ($30 - 40^\circ\text{C}$), como ocurre en el Norte de México (climate-data.org), se espera que la dosis de ozono aplicada al sistema de ozonización se incremente considerablemente con respecto a la dosis aplicada a temperaturas entre $20 - 25^\circ\text{C}$.

2.5.4 SISTEMA DE OZONIZACIÓN

Los sistemas de ozonización constan de cinco componentes (Figura 6): 1) la unidad de preparación del gas, 2) la fuente de energía eléctrica, 3) el generador de ozono, 4) el contactor gas – líquido (G-L) y 5) la unidad para la eliminación del ozono no transferido (Rice, 1996).

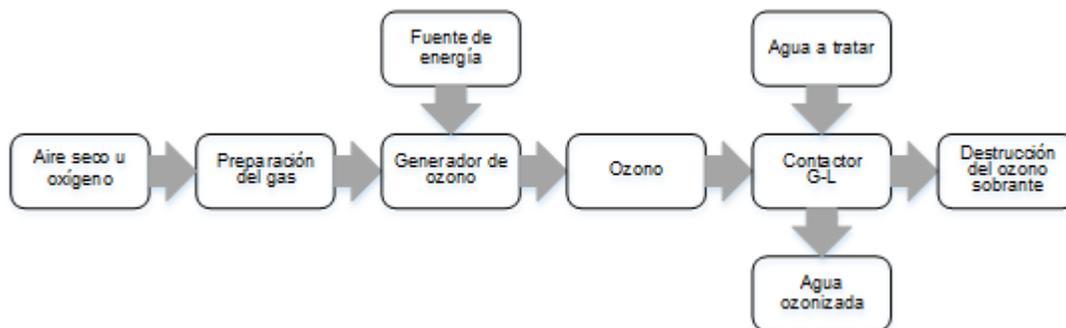


Figura 6. Esquema del proceso de ozonización
Fuente: Rice, 1996.

PREPARACIÓN DEL GAS DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación de gas proporciona una fuente limpia y seca de oxígeno al generador, a fin de asegurar un gas de alta calidad, libre de aceites y partículas (Langlais et al., 1991). La calidad de ozono producido depende del tipo de gas alimentado. Éste puede ser: aire, aire enriquecido con oxígeno, oxígeno líquido de alta pureza (LOX), oxígeno de alta pureza (de generación criogénica o de separación de aire de adsorción por oscilación de presión) (Tabla 10).

Tabla 10. Comparación de los gases de alimentación para sistemas de ozonización

| Alimentación | Ventajas | Desventajas |
|-----------------------|---|--|
| Aire | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo de uso común • Tecnología disponible • Adecuado para sistemas de escala pequeña e industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo de energía por volumen de ozono producido • Requiere del uso extensivo de equipo para la depuración del gas • Concentración máxima de O₃: 3-5% |
| Oxígeno | <ul style="list-style-type: none"> • Altas concentraciones de O₃ (8-14%) • Se duplica la concentración de ozono para un mismo generador • Adecuado para sistemas de escala pequeña e industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Aspectos relacionados con la seguridad • Se requiere de materiales resistentes a oxígeno |
| LOX (oxígeno líquido) | <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de menos equipos • Operación y mantenimiento sencillos • Adecuado para escala pequeña e industrial • Se puede almacenar oxígeno en exceso para cubrir picos de demanda | <ul style="list-style-type: none"> • Los costos de LOX son variables • Almacenamiento de oxígeno en el sitio • Pérdida del LOX almacenado cuando no se usa |
| Oxígeno criogénico | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo similar utilizado para preparación de aire • Adecuado para sistemas de gran escala • Se puede almacenar oxígeno para cumplir con demandas pico | <ul style="list-style-type: none"> • Equipo de mayor complejidad que el LOX • Alto nivel de sofisticación en el equipo de manejo de gas • Altos requerimientos de capital • Mantenimiento y operación compleja |

Fuente: U.S. EPA, 1999.

Los sistemas de alimentación de oxígeno líquido consisten en un tanque de almacenamiento, evaporadores para convertir el líquido en un gas, filtros para eliminar impurezas y reguladores de presión para limitar la presión del gas a los generadores de ozono. Los sistemas de alimentación de aire son más complicados, ya que el aire debe acondicionarse adecuadamente para evitar daños en el generador. El aire debe estar limpio y seco, con un punto de rocío máximo de -60°C a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno, que aceleran la corrosión de los electrodos. Los sistemas de preparación de aire típicamente se componen de compresores de aire, filtros, secadores y reguladores de presión. La elección del tipo de gas de alimentación depende de la disponibilidad del mismo, de los requerimientos de ozono en el proceso y del costo (U.S. EPA, 1999).

FUENTE DE PODER

Procura la energía necesaria para convertir el oxígeno en ozono. La fuente de poder debe controlar los requerimientos de voltaje, amperaje y potencia del equipo de generación de ozono, así como el equipo auxiliar que requiera energía (preparación del gas de alimentación, equipo de contacto, destrucción de gas residual, controles, instrumentos y monitoreo) (Rice, 1996).

GENERADOR DE OZONO

Es el receptor de la energía eléctrica, en el cual se produce ozono y como subproductos, luz y calor. Los sistemas de ozonización empleados en el tratamiento de agua generan ozono por medio de una descarga de corona producida entre dos dieléctricos. El voltaje requerido para producir ozono por descarga en corona es proporcional a la presión del gas fuente en el generador y al ancho del espacio de descarga. Teóricamente, el mayor rendimiento (ozono producido por unidad de área de dieléctrico) sería el resultado de un alto voltaje, una alta frecuencia, una gran constante dieléctrica y un dieléctrico delgado (Langlais et al., 1991)

Los generadores de ozono se clasifican por la frecuencia de la potencia aplicada a los electrodos. Los generadores de baja frecuencia (50 o 60 Hz) y frecuencia media (60 a 1,000 Hz) son los más comunes en la industria del agua, sin embargo, algunos generadores de alta frecuencia también están disponibles (Tabla 11). Los generadores de frecuencia media son eficientes y pueden producir ozono económicamente a altas concentraciones, pero generan más calor que los generadores de baja frecuencia y requieren una fuente de alimentación más complicada para aumentar la frecuencia suministrada por la energía de la red pública (U.S. EPA, 1999).

Tabla 11. Comparación de los generadores de ozono

| Característica | Frecuencia baja (50 – 60 Hz) | Frecuencia media (hasta 1000 Hz) | Frecuencia alta (> 1000 Hz) |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Grado de sofisticación electrónica | Bajo | Alto | Alto |
| Tensiones máximas | 19.5 | 11.5 | 10 |
| Relación de rechazo | 5:1 | 10:1 | 10:1 |
| Agua de refrigeración (gal/lb de ozono producido) | 0.5 – 1.0 | 0.5 – 1.5 | 0.25 -1.0 |
| Rango de aplicación típico | < 500 lb/día | Hasta 2000 lb/día | Hasta 2000 lb/día |
| Concentraciones operativas | | | |
| wt -% en el aire | 0.5 – 1.5% | 1.0 – 2.5% | 1.0 – 2.5% |
| wt -% en oxígeno | 2.0 – 5.0% | 2.0 – 12% | 2.0 – 12% |
| Producción óptima de ozono (como proporción de la capacidad total del generador) | 60 – 75% | 90 – 95% | 90 – 95% |
| Diferencial de agua de enfriamiento óptimo | 8 – 10 °F | 5 – 8 °F | 5 – 8 °F |
| Potencia requerida (kW-h / lb O ₃) | | | |
| Alimentación con aire | 8 – 12 | 8 – 12 | 8 – 12 |
| Alimentación con O ₂ | 4 – 6 | 4 – 6 | 4 – 6 |
| Requisitos de sistema de alimentación de aire (kW-h / lb O ₃) | 5 – 7 | 5 – 7 | 5 – 7 |

Fuente: U.S. EPA, 1999.

CONTACTOR GAS – LÍQUIDO

El contactor gas – líquido transfiere el gas rico en ozono al agua a tratar a fin de entrar en contacto íntimo con los contaminantes para oxidar y/o desinfectarlos. El tipo de contacto depende del objetivo específico de la ozonización. Los objetivos se pueden clasificar como de reacciones rápidas: este es el caso de la inactivación de microorganismos salvo algunas excepciones, la oxidación de hierro, magnesio y sulfuros, y el mejoramiento de la floculación; y de reacciones lentas: la oxidación de sustancias más difíciles, como plaguicidas, sustancias orgánicas volátiles, microorganismos altamente resistentes a la desinfección y otras sustancias orgánicas complejas que por razones cinéticas tienden a requerir tiempos de reacción más largos. Las cámaras de contacto más comunes son: los contactores con difusores de burbuja fina, los inyectores y los mezcladores de turbina (U.S. EPA, 1999).

Contadores con difusores de burbuja fina

Los contactores con difusores de burbuja fina (Figura 7) ofrecen las ventajas de no requerir energía adicional, altas tasas de transferencia de ozono, flexibilidad de proceso, simplicidad operativa y sin partes móviles. La cantidad de etapas puede variar de dos a seis para lograr la desinfección con ozono (Langlais et al., 1991). Los contactores con difusores de burbuja fina se construyen típicamente con profundidades de agua de 4 a 7 metros para lograr una eficiencia de transferencia de ozono del 85 al 95%. Como todo el ozono no se transfiere al agua, las cámaras del contactor están cubiertas para contener el gas residual.

Estos contactores utilizan difusores de cerámica o de acero inoxidable con forma de varilla o disco para generar burbujas. La canalización de burbujas depende del tipo de difusores utilizados y del espacio entre los difusores. La configuración del contactor debe ser diseñada para proporcionar un sistema hidráulico de flujo de pistón. Esta configuración minimiza el volumen total del contactor al mismo tiempo que cumple con los requisitos de CT para el sistema. El volumen del contactor se determina junto con la dosis de ozono aplicada (DOA) y la concentración de ozono residual estimada para satisfacer el requisito de CT de desinfección (Lage, 2010).

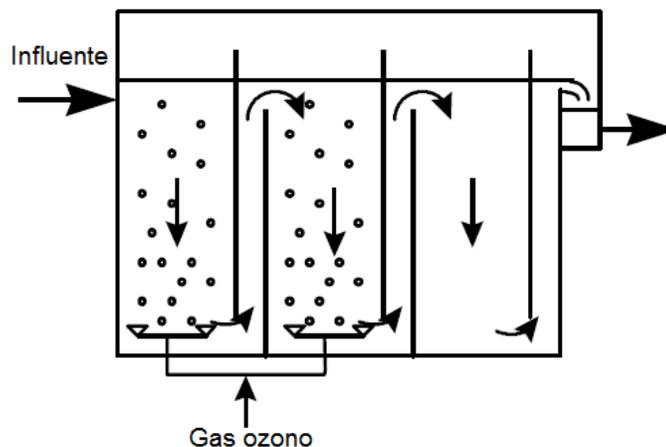


Figura 7. Contador con difusores de burbuja fina

Inyectores

Los inyectores se utilizan comúnmente en Europa, Canadá y Estados Unidos (Langlais et al., 1991). El ozono se inyecta en una corriente de agua bajo presión negativa, que se genera en una sección Venturi (Figura 8), tirando del ozono a la corriente de agua. En muchos casos, una corriente lateral del flujo total se bombea a una presión más alta para aumentar el vacío disponible para la inyección de ozono. Después de que se inyecta el ozono en la corriente secundaria, que contiene todo el ozono agregado, se combina con el resto del flujo de la planta en condiciones de alta turbulencia para mejorar la dispersión del ozono en el agua.

La relación gas/líquido (G/L^*) es un parámetro clave utilizado en el diseño de inyectores. Esta relación debe ser inferior a 0.067 cfm/gpm para optimizar la eficiencia de la transferencia de ozono (Langlais et al., 1991). El cumplimiento de este criterio generalmente requiere dosis de ozono relativamente bajas y concentraciones de gas de ozono superiores al 6% en peso (DeMers and Renner, 1992). Para cumplir los requisitos de desinfección de CT, se requiere tiempo de contacto adicional después del inyector, generalmente en un reactor de flujo pistón.

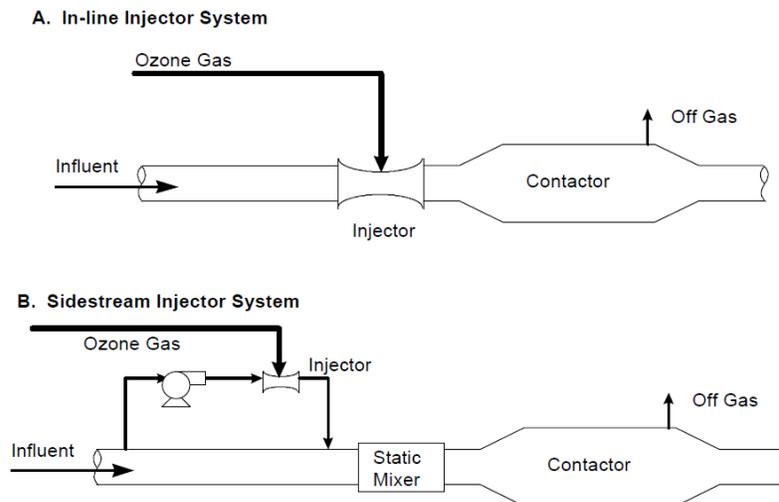


Figura 8. Inyectores de ozono

Mezcladores de turbina

Los mezcladores de turbina se utilizan para alimentar el gas de ozono en un contactor y mezclarlo con el agua (Figura 9). La eficiencia de la transferencia de ozono para los mezcladores de turbina puede exceder el 90%. Sin embargo, la potencia requerida es de 2.2 a 2.7 kW-h de energía por lb de ozono transferido (Dimitriou, 1990). Los depósitos de mezcla de turbina varían en la profundidad del agua de 2 a 5 metros y las áreas de dispersión de 1.5 a 5 metros. Al igual que con el inyector, es posible que no haya suficiente tiempo de contacto disponible en el tanque de la turbina para cumplir con los requisitos de CT de desinfección; en consecuencia, puede requerirse un volumen de contacto adicional.

*Relación G/L : en un sistema en continuo, con el objeto de mantener condiciones hidrodinámicas adecuadas se recomienda mantener una relación de 0.15 a 0.20 del gasto de alimentación de ozono (G) con respecto al gasto del agua (L), en condiciones normales de presión y temperatura (Langlais et al., 1991).

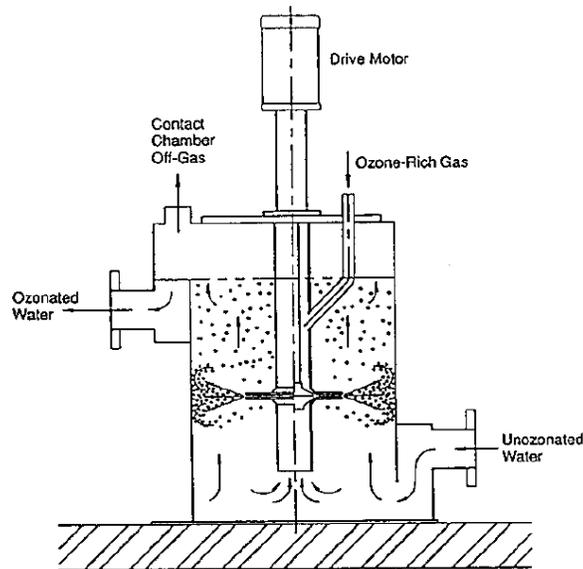


Figura 9. Mezclador de turbina

La Tabla 12 resume las ventajas y desventajas contactores con difusores de burbuja fina, los inyectores y los mezcladores de turbina.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de los contactores G-L

| Contactor | Ventajas | Desventajas |
|---|--|--|
| Contactor con difusores de burbuja fina | <ul style="list-style-type: none"> • No tiene partes móviles • Transferencia de ozono efectiva • Baja pérdida de carga hidráulica • Simplicidad operacional | <ul style="list-style-type: none"> • La profundidad es la base del contacto gas-liquido • Columnas verticales de burbujas • Mantenimiento de difusores y tuberías |
| Inyectores | <ul style="list-style-type: none"> • Inyección y mezclado estático, no tienen partes móviles • Transferencia de ozono efectiva • La altura es menor a la del contactor de burbuja fina | <ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de carga (uso de energía) debido a los mezcladores estáticos por lo que puede requerirse bombeo • Capacidad de cobertura limitada por el sistema de inyección • Operación compleja y costo elevado |
| Contactor con mezclador de turbina | <ul style="list-style-type: none"> • La transferencia de ozono es mejorada por la alta turbulencia que resulta del burbujeo fino • La altura es menor a la del contactor de burbuja fina • Las turbinas pueden retirarse para su limpieza o intercambio • Se eliminan los problemas de taponamiento de los difusores | <ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de energía • Se debe mantener un flujo constante de gas, la eficiencia de transferencia puede disminuir • Requerimientos de mantenimiento de la turbina y del motor |

Fuente: U.S. EPA, 1999.

DESTRUCCIÓN DEL GAS RESIDUAL

El exceso de ozono no disuelto, se destruye convirtiéndolo en oxígeno, antes de liberarlo a la atmósfera. En las plantas de tratamiento de agua se utiliza uno de los tres métodos siguientes para destruir el ozono sobrante: 1) descomposición térmica mediante la elevación de la temperatura a más de 300°C; 2) descomposición catalítica por pasaje a través de metales u óxidos de metal, y 3) la absorción en carbón activado granular húmedo (Langlais et al., 1991).

2.5.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1999), las principales ventajas y desventajas de la desinfección de agua con ozono son las siguientes:

Ventajas

- Tiene efecto sobre un amplio intervalo de pH y reacciona rápidamente con bacterias, virus y protozoos (tales como *Giardia* y *Cryptosporidium*).
- Tiene propiedades germicidas más fuertes que la cloración.
- Tiene un poder oxidante muy fuerte con un tiempo de reacción corto (10 – 30 minutos).
- No produce residuos nocivos que deban eliminarse después de la ozonización porque éste se descompone rápidamente.
- Puede eliminar una amplia variedad de problemas inorgánicos, orgánicos y microbiológicos, así como problemas de sabor y olor.
- Se genera en el lugar y, por lo tanto, hay menos problemas de seguridad asociados con el envío y la manipulación.
- Eleva la concentración de oxígeno disuelto del efluente.

Desventajas

- La ozonización es una tecnología más compleja que la desinfección con cloro o UV que requiere equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
- Es muy reactivo y corrosivo, requiriendo material resistente a la corrosión.
- No provee un efecto germicida residual para inhibir o prevenir el rebrote.
- Los subproductos de ozonización todavía se están evaluando y es posible que algunos subproductos sean cancerígenos. Éstos pueden incluir subproductos bromados, aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos. Esta es una razón por la que el sistema de post-filtración puede incluir un filtro de carbón activado.
- El sistema puede requerir un pretratamiento para la reducción de la dureza.
- Es menos soluble en agua, en comparación con el cloro, y, por lo tanto, son necesarias técnicas especiales de mezclado.

2.5.6 INACTIVACIÓN CON OZONO DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS

El efecto de la desinfección con ozono en varios microorganismos patógenos ha sido reportado. El ozono puede disminuir la cantidad de algunos virus como el virus Norwalk, el poliovirus 1 y el bacteriófago MS2 (Shin an Sobsey 2003). Asimismo, puede destruir organismos zoonóticos presentes en muestras de agua como *Acanthamoeba* spp., *Naegleria* spp., *A. castellanii* (Thomas et al., 2008). Además, el ozono inactiva bacterias como *Bacillus subtilis*, *Chlamydia trachomatis* y *C. pneumoniae* (Cho et al., 2003) y reduce el número de oocistos de *Cryptosporidium* y quistes de *Giardia* (Gerrity et al., 2011).

El ozono causa deformación de la superficie y daño de los huevos de *Toxocara canis*, inactivación logarítmica de *Ascaris lumbricoides* y *Ascaris suum*, destrucción total de *Fasciola hepatica*, *Strongyloides* sp., así como la inactivación completa de *Dipylidium caninum* (Orta et al., 2002; Rojas, 2004; Mun et al., 2009; Thomas et al., 2008). El proceso de ozonización resulta ser altamente eficiente especialmente en organismos que, por sus propiedades físicas, son muy resistentes a diferentes tratamientos de desinfección.

El ozono reacciona con biomoléculas tales como proteínas, carbohidratos y ácidos grasos poliinsaturados ligados a la albúmina, y participa en la peroxidación lipídica (Bocci, 2011). Los huevos de nemátodo consisten químicamente en proteínas y carbohidratos (mucopolisacáridos), que les ayudan a permanecer en el medio ambiente durante largos periodos y siguen siendo infecciosos. A pH alcalino, el ozono provoca una deformación total de los huevos de nemátodos, así como agujeros y protuberancias en su superficie, lo que indica que la capa externa es degradada por el ozono. Además, este daño puede llegar hasta las capas internas y el ozono puede incluso dañar el ADN, afectando su capacidad infectiva (Ibáñez et al., 2013).

2.5.7 BENEFICIOS DEL OZONO EN LA AGRICULTURA

Durante los últimos años, se ha demostrado que el ozono puede incrementar la vida útil de frutas y hortalizas gracias a su potencial altamente oxidante que destruye los componentes vitales de las células de los microorganismos patógenos (ácidos grasos insaturados, aminoácidos, péptidos y proteínas), además de deteriorar los ácidos nucleicos afectando su capacidad metabólica y reproductiva (Han et al., 2002). Asimismo, se cuenta con suficiente información de los beneficios adicionales de la aplicación de ozono como desinfectante del agua de riego en el campo de la agricultura (Orta, 2006; Campos, 2008; Orta, 2013).

Irrigar cultivos con agua ozonizada provoca incrementos significativos en el área foliar, la materia seca del brote y el grosor del tallo, estimula al crecimiento y con ello la productividad, incrementa el contenido de oxígeno disuelto en el agua, garantiza la calidad microbiológica del agua y aumenta la biodegradabilidad del efluente sin ninguna supresión relevante de los macronutrientes vegetales (N, P, K, Ca, Mg) ya presentes (Graham et al., 2011; Martínez et al., 2011). El ozono tiene la capacidad de disminuir el uso de fertilizantes y los efectos adversos sobre la salinidad o la acidificación del suelo, por la sustitución de fertilizantes y nematicidas.

La aplicación del ozono forma parte de las tecnologías avanzadas de tratamiento, y como en otros casos, su implementación no es la primera opción a considerar cuando se trata de resolver problemas del agua, no obstante, las excelentes cualidades oxidantes y su efectividad pueden dar solución a problemas que otras opciones no han logrado. Lo anterior se atribuye en parte a los costos que implican su aplicación y, en gran medida también se debe al desconocimiento y la poca experiencia de esta tecnología en el campo de aplicación, y en el caso de la agricultura no es la excepción.

Las zonas agrícolas del Norte de México dedicadas al cultivo de tomate, desde hace algunos años, enfrentan pérdidas económicas ocasionada por el nemátodo *Meloidogyne enterolobii*. Aunque se han implementado acciones para controlar la población de este organismo en suelo, también se ha detectado su presencia en el agua de irrigación. Es en el último caso donde el ozono puede ser una alternativa tecnológica prometedora para la inactivación de los nemátodos. Al respecto, existen pocos estudios científicos sobre la efectividad del ozono para inactivar nemátodos, por lo que es necesario mayor investigación. Es por ello que en este trabajo se investigó la inactivación de *M. enterolobii* en agua de riego para generar conocimiento y experiencia que contribuyan en la solución de esta problemática.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Como parte de la estrategia experimental, el trabajo de investigación se desarrolló de acuerdo con la metodología y actividades correspondientes resumidas en el siguiente diagrama.

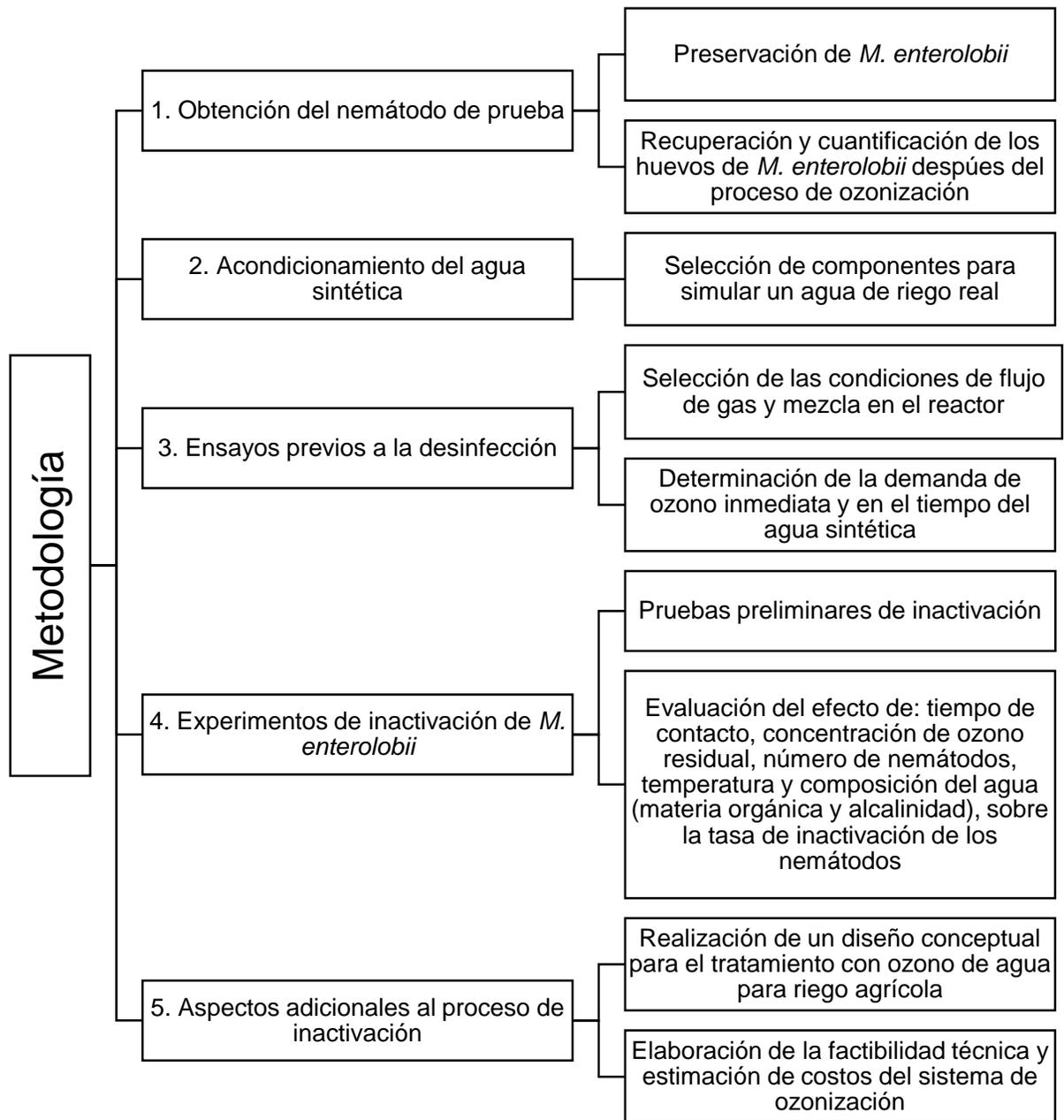


Figura 10. Diagrama conceptual de la metodología utilizada

3.1 NEMÁTODO DE PRUEBA

3.1.1 PRESERVACIÓN

El organismo con el que se trabajó fue el nemátodo *Meloidogyne enterolobii*. Dicho nemátodo fue aislado previamente a partir de raíces agalladas de plantas de tomates. Los huevos de nemátodos se mantuvieron preservados en una solución salina (0.85% NaCl, suspensión stock) a 4°C. El seguimiento de soluciones “stock” se realizó a través de observaciones al microscopio (Microscópico óptico Zeiss modelo Axio Lab.A1).

3.1.2 RECUPERACIÓN Y CUANTIFICACIÓN

Después de las pruebas de inactivación con ozono, los huevos de nemátodo fueron recuperados por la técnica de concentración por flotación (NMX-AA-113-SCFI-1999 adaptada). Esta técnica se basa en lograr la concentración de los huevos de los parásitos por flotación en un líquido de mayor densidad específica que ellos. Adicionalmente, por medio de centrifugación, las muestras se limpian de las partículas de mayor tamaño permitiendo la recuperación de los huevos de nemátodo de la fase clarificada por medio de filtración.

El procedimiento general consistió en pasar el volumen total de muestra (1 L para este trabajo), a través de una membrana MF-Millipore (compuesta de ésteres de celulosa mixta EMD) con tamaño de poro de 0.45 µm. Lo retenido por la membrana se recuperó con agua destilada en un tubo Corning de 50 ml de capacidad, el cual se centrifugó a 2500 rpm durante 10 minutos para posteriormente decantar el sobrenadante. Las pastillas obtenidas por centrifugación se homogenizaron empleando 10 ml de solución azucarada de Sheather con densidad específica de 1.18 (911.68 g de azúcar de caña, 10 ml de formaldehído al 10% y 1.3 L de agua destilada; densidad verificada con un densímetro). Las muestras así tratadas volvieron a centrifugarse (2500 rpm x 10 min). El sobrenadante se recuperó a través de la membrana MF-Millipore y con repetidos enjuagues de agua destilada se eliminaron los residuos de la solución azucarada. Finalmente, el sobrenadante fue decantado salvo 2 ml que fue lo que se observó bajo microscopio óptico.

La verificación de la la viabilidad de los huevos de *M. enterolobii*, se llevó a cabo incubándolos a 25°C durante 5 días para poder observar el daño ocasionado por el ozono. Bajo microscopio óptico se realizó una valoración de la estructura, y se clasificaron como huevos viables y no viables. Para este estudio, dichos criterios fueron empleados para determinar el efecto del ozono en la viabilidad de *Meloidogyne enterolobii*.

3.2 AGUA SINTÉTICA

Para simular un agua de riego agrícola se elaboró lo que llamaremos técnicamente “agua sintética”. Los componentes y concentraciones de esta agua sintética se seleccionaron con base en las características que normalmente tiene un agua superficial. Con base en la literatura (Nghiem et al., 2004; Alrousan et al., 2009; Cerón, 2016) y la calidad presentada en el agua de escorrentía en muestreos previos de sitios agrícolas (Prado, 2017), el agua sintética se preparó utilizando agua destilada, carbonato de calcio para añadir alcalinidad, ácidos húmicos como materia orgánica natural, sulfato de sodio, nitrato de sodio, fosfato sódico como iones inorgánicos. En la Tabla 13 se resume la composición del agua utilizada.

Tabla 13. Composición del agua sintética de prueba

| Componente | Concentración (mg/L) |
|---------------------|----------------------|
| Ácidos húmicos | 7.0 |
| Carbonato de calcio | 40 |
| Nitrato de sodio | 1.0 |
| Sulfato de sodio | 24 |
| Fosfato sódico | 2.0 |

La caracterización fisicoquímica del agua sintética se realizó de acuerdo con los Métodos Normalizados para el Análisis de Agua Potable y Aguas Residuales (APHA-AWWA-WEF, 2005) tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 14, los cuales fueron seleccionados por su importancia en los cultivos agrícolas (FAO, 1985).

Tabla 14. Parámetros de calidad del agua de riego

| Parámetros | Observaciones |
|-----------------------------------|---|
| pH | Valores extremos pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes y no ser asimilables para las plantas. |
| Nitratos | El nitrógeno en forma de nitratos no está disponible para las plantas y éstos son arrastrados por la escorrentía superficial. |
| Fósforo total | El fósforo es uno de los nutrientes primarios, junto con el nitrógeno, para el crecimiento de los cultivos. |
| Alcalinidad | Indica la capacidad tampón del agua para mantener estable el pH como cuando se adicionan fertilizantes ácidos. |
| Sólidos suspendidos totales (SST) | Un alto contenido de SST puede causar problemas en el sistema de riego. |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | Un elevado contenido de materia oxidable podría limitar el proceso de desinfección, ya que el ozono puede reaccionar con este tipo de compuestos. |

La Tabla 15 muestra la calidad fisicoquímica del agua sintética utilizada.

Tabla 15. Composición fisicoquímica del agua sintética

| pH | Nitratos (mg N-NO ₃ /L) | Fósforo total (mg PO ₄ ³⁻ /L) | Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L) | SST (mg/L) | DQO (mg/L) |
|------------|---------------------------------------|--|--|---------------|---------------|
| 8.3 ± 0.25 | 0.8 ± 0.1 | 2.07 ± 0.21 | 40 ± 1.5 | 25 ± 2.16 | 17 ± 1.0 |

3.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

Los experimentos se llevaron a cabo en una unidad de desinfección escala laboratorio (Anexo I) integrada por un separador de aire (Airsep modelo AS-12, USA), un generador de ozono (Labo 76, Emery Trailigaz, USA) con capacidad de producción de $1.9 \text{ gO}_3/\text{h}$, y un reactor de tanque agitado de 1 L como contactor gas – líquido. El reactor fue operado por lotes y contó con puertos de entrada y salida para el gas ozono. Las concentraciones de ozono en fase gas a la entrada y a la salida del sistema (C_{ge} , C_{gs}) fueron determinadas mediante el método yodométrico (Birdsall et al., 1952). El gas sin reaccionar fue enviado a la unidad de destrucción catalítica para su liberación segura al ambiente.

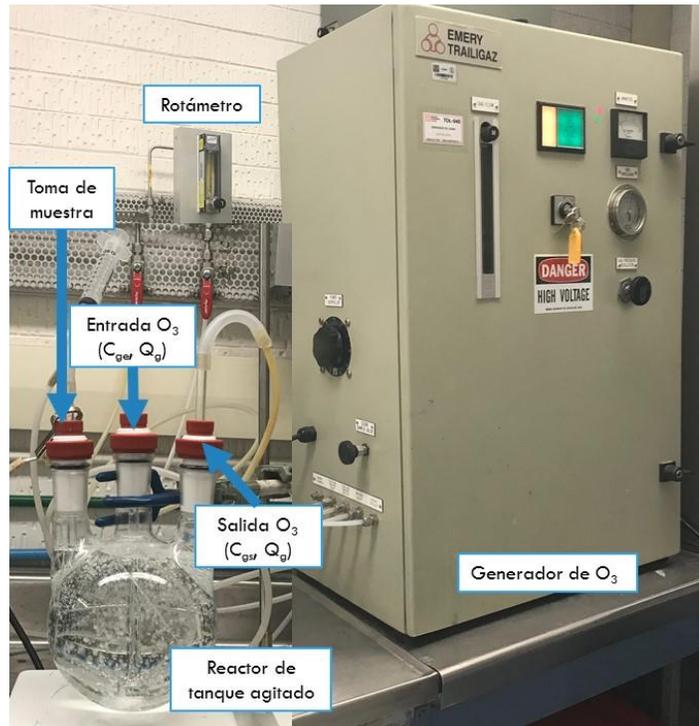


Figura 11. Arreglo experimental I

El ozono fue inyectado al medio acuoso por medio de un difusor de vidrio de placa porosa con tamaño de poro de $10 - 15 \mu\text{m}$. La mezcla ozono – agua en el reactor se mantuvo en agitación mediante una barra magnética. El reactor tuvo un puerto de muestreo de agua para análisis de ozono residual (Figura 11). La concentración de ozono residual en el agua ($[\text{O}_3]_r$) se midió mediante el método colorimétrico de índigo (Hoigné and Bader, 1976).

Para las pruebas donde la temperatura fue una variable a analizar, el sistema se mantuvo a temperatura constante mediante calentamiento indirecto por convección térmica de agua (Figura 12).

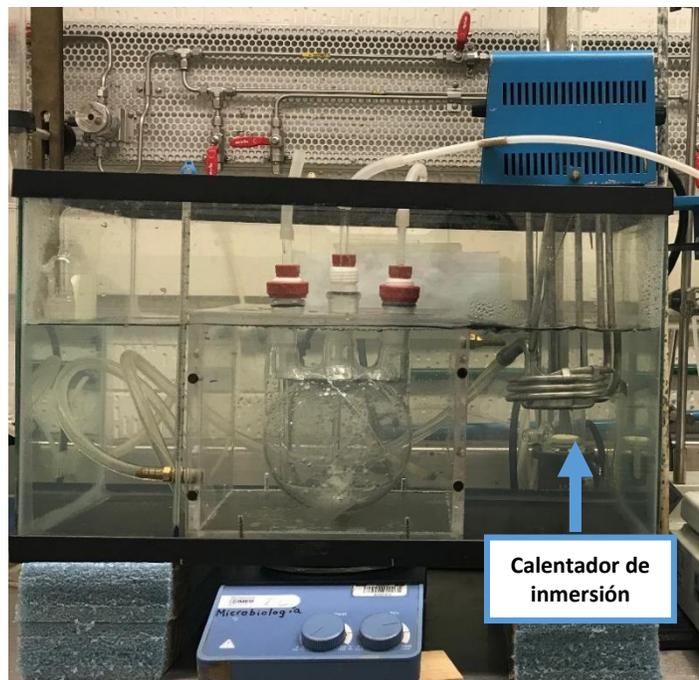


Figura 12. Arreglo experimental II

Para cada prueba, se determinó la dosis de ozono aplicada (DOA), la dosis de ozono transferida (DOT), la eficiencia de transferencia (ET) y valores de CT (concentración de ozono residual x tiempo), mediante las ecuaciones de la Tabla 16.

Tabla 16. Ecuaciones de balance de masa de ozono en reactor por lote

| Ecuación | | Donde: |
|-----------------------------|--|---|
| Dosis de ozono aplicada | $DOA = \frac{C_{ge} \cdot Q_g \cdot t}{V_r}$ | C_{ge} Concentración de ozono en la fase gas a la entrada al reactor (mgO_3/L gas) |
| Dosis de ozono transferida | $DOT = \frac{Q_g (C_{ge} - C_{gs}) t}{V_r}$ | C_{gs} Concentración de ozono en fase gas a la salida del reactor (mgO_3/L gas) |
| Eficiencia de transferencia | $ET = \frac{C_{ge} - C_{gs}}{C_{ge}} \times 100$ | $[O_3]_r$ Concentración de ozono en la fase líquida (mgO_3/L agua) |
| CT | $CT = [O_3]_r \times t$ | Q_g Flujo de gas de entrada (L/min) t Tiempo de ozonización (min) V_r Volumen del reactor (L) |

3.4 ENSAYOS PREVIOS A LA DESINFECCIÓN

3.4.1 CONDICIONES DE FLUJO DE GAS Y MEZCLA EN EL REACTOR

Durante los ensayos de inactivación del nemátodo en el reactor de tanque agitado, el flujo de gas ozono (Q_g) y las condiciones de mezclado se mantuvieron constantes. Para conocer las condiciones de mayor eficiencia de transferencia de ozono en el reactor, se realizaron ensayos con el agua de prueba bajo diferentes condiciones de flujo del gas O_3 con valores de 0.2, 0.5 y 1.0 L/min y agitación magnética, manteniendo constante la concentración de gas ozono a la entrada del reactor (C_{ge}). El flujo que proporcionó el mayor porcentaje de transferencia de ozono fue 0.2 L/min y se utilizó en todas las pruebas de inactivación del nemátodo.

3.4.2 DEMANDA INMEDIATA DE OZONO Y CONCENTRACIÓN RESIDUAL

Se realizaron pruebas experimentales para determinar la demanda de ozono del agua sintética utilizada (inmediata y en el tiempo), de acuerdo con el método del ozono en solución (Hoigné and Bader, 1994, en Duguet, 1998). Para ello se preparó una solución saturada con ozono empleando agua destilada hasta alcanzar una concentración residual de 2.4 mgO_3/L . Posteriormente, se tomaron 10 muestras del agua sintética problema, cada una con 50 ml de volumen y se agregaron volúmenes crecientes 0.1 ml de agua saturada con ozono; es decir, a la primera muestra se agregó 0.1 ml, a la segunda 0.2 ml y así sucesivamente hasta agregar un volumen total de 1 ml. Enseguida, se midió la concentración residual en el agua mediante el método colorimétrico de índigo. De esta manera se determinaron los primeros valores de ozono residual en el agua y se elaboró una gráfica de dosis de ozono transferida (DOT) vs la concentración de ozono residual en el agua ($[O_3]_r$). La demanda de ozono fue cubierta cuando el valor de ozono residual fue diferente de cero.

La determinación de las concentraciones de ozono residual ensayadas se realizó con pruebas de adsorción en agua utilizando diferentes concentraciones en fase gas, tanto para agua destilada como en agua sintética.

3.5 EXPERIMENTOS DE INACTIVACIÓN DE *M. ENTEROLOBII* CON OZONO

3.5.1 PRUEBAS PRELIMINARES DE INACTIVACIÓN

Se realizaron ensayos bajo condiciones controladas de ozono residual sin limitaciones de transferencia de ozono. Se experimentaron condiciones estándares de desinfección (0.4 mg/L de ozono residual y 4 min de contacto; Richard, 1985) y niveles superiores éstos. Los ensayos se realizaron con volúmenes de reacción de 50 ml en tubos Corning, utilizando agua saturada de concentración conocida para dosificar concentraciones en un intervalo de 0.4 a 2.5 mgO₃/L. Esta agua se aplicó directamente a una suspensión de huevos de nemátodo, para obtener un contenido final en la mezcla de reacción igual a 5H/50 ml. Los tiempos de contacto evaluados fueron 4 y 10 min. Al final de cada tiempo de contacto se determinó el residual de ozono, así como el porcentaje inactivación de los huevos de nemátodos.

En una segunda etapa, las pruebas se realizaron en el reactor de tanque agitado de 1 L donde se utilizó agua destilada dopada de una cantidad determinada de huevos (Tabla 17). Con la finalidad de mantener un valor de CT constante, se ozonizó el agua destilada previamente durante 6 – 8 min para alcanzar una condición de equilibrio de ozono residual en el agua e inmediatamente después se inocularon los huevos. A partir de este momento se contabilizó el tiempo de contacto efectivo.

Tabla 17. Factores y dominio experimental de las pruebas preliminares

| Factor | Niveles de factor | |
|---|-------------------|-----|
| Tiempo de contacto (min) | 4 | 10 |
| Concentración de O ₃ residual (mg/L) | 0.5 | 1.0 |
| Contenido de nemátodos (H/L) | 5 | 20 |

H: huevos de *Meloidogyne enterolobii*

3.5.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS A

Para evaluar el efecto de la concentración de ozono residual en el agua, el tiempo de contacto y el número de huevos inoculados, sobre la tasa de inactivación, se utilizó un diseño factorial 3³ completamente aleatorizado (Tabla 18). Se realizaron 27 experimentos, correspondientes a 3 niveles de tiempo de contacto, 3 de concentración de ozono residual en el agua y 3 de concentración de huevos (Tabla 19). Cada experimento se realizó por duplicado.

La concentración de ozono disuelto y tiempo de contacto se seleccionaron considerando los resultados de los ensayos preliminares. Como límite inferior de la concentración de ozono residual, se utilizó 0.2 mg/L. En cuanto al tiempo de contacto, se seleccionaron valores por arriba del estándar: 4, 10 y 15 min. Se estableció un valor mínimo de concentración de nemátodos igual a 5 H/L para facilitar el manejo de los organismos y, además, se utilizaron valores superiores a éste: 10 y 20 H/L.

Tabla 18. Factores y dominio experimental A

| Factor | Niveles de factor | | |
|---|--------------------------|-----|-----|
| Concentración de O ₃ residual (mg/L) | 0.2 | 0.5 | 1.5 |
| Tiempo de tratamiento (min) | 4 | 10 | 15 |
| Contenido de nemátodos (H/L) | 5 | 10 | 20 |

Tabla 19. Matriz del diseño y plan de experimentación A

| No. | A | B | C | Concentración de O₃ residual (mg/L) | Tiempo (min) | Contenido de nemátodos (H/L) |
|------------|----------|----------|----------|---|---------------------|-------------------------------------|
| 1 | - | - | - | 0.2 | 4 | 5 |
| 2 | - | - | 0 | 0.2 | 4 | 10 |
| 3 | - | - | + | 0.2 | 4 | 20 |
| 4 | - | 0 | - | 0.2 | 10 | 5 |
| 5 | - | 0 | 0 | 0.2 | 10 | 10 |
| 6 | - | 0 | + | 0.2 | 10 | 20 |
| 7 | - | + | - | 0.2 | 15 | 5 |
| 8 | - | + | 0 | 0.2 | 15 | 10 |
| 9 | - | + | + | 0.2 | 15 | 20 |
| 10 | 0 | - | - | 0.5 | 4 | 5 |
| 11 | 0 | - | 0 | 0.5 | 4 | 10 |
| 12 | 0 | - | + | 0.5 | 4 | 20 |
| 13 | 0 | 0 | - | 0.5 | 10 | 5 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 10 | 10 |
| 15 | 0 | 0 | + | 0.5 | 10 | 20 |
| 16 | 0 | + | - | 0.5 | 15 | 5 |
| 17 | 0 | + | 0 | 0.5 | 15 | 10 |
| 18 | + | + | + | 0.5 | 15 | 20 |
| 19 | + | - | - | 1.5 | 4 | 5 |
| 20 | + | - | 0 | 1.5 | 4 | 10 |
| 21 | + | - | + | 1.5 | 4 | 20 |
| 22 | + | 0 | - | 1.5 | 10 | 5 |
| 23 | + | 0 | 0 | 1.5 | 10 | 10 |
| 24 | + | 0 | + | 1.5 | 10 | 20 |
| 25 | + | + | - | 1.5 | 15 | 5 |
| 26 | + | + | 0 | 1.5 | 15 | 10 |
| 27 | + | + | + | 1.5 | 15 | 20 |

3.5.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS B

Para este ensayo, se llevó a cabo un diseño factorial fraccional 2^{5-1} con la finalidad de evaluar el efecto del contenido de materia orgánica y alcalinidad en el agua, la concentración de ozono en la fase gas a la entrada al reactor, el tiempo de contacto y la temperatura ambiente sobre el porcentaje de inactivación de los huevos de nemátodos (Tabla 20). El número de nemátodos que se ingresaron al contactor fue 5 H/L.

Al plantear el experimento 2^{5-1} se renunció voluntariamente a las interacciones de orden tres o superior. Con este diseño, se obtienen modelos suficientemente aproximados considerando sólo los efectos principales y las interacciones de dos factores. Por tanto, se prescinde de parte de la información que proporciona un diseño 2^5 completo y esto permite, a su vez, descartar de la realización de algunos experimentos.

Tabla 20. Factores y dominio experimental B

| Factor | Descripción | Niveles de factor | |
|--------|---|-------------------|-----------|
| | | Nivel (-) | Nivel (+) |
| A | Temperatura (°C) | 20 | 35 |
| B | Concentración de O ₃ a la entrada (mg/L) | 6 | 16 |
| C | Tiempo de contacto (min) | 8 | 16 |
| D | Materia orgánica (mg/L) | 5 | 10 |
| E | Alcalinidad (mg/L) | 40 | 100 |

Se analizó el efecto de 5 factores a dos niveles cada uno. Esto implica que se ejecutaron 16 condiciones experimentales (Tabla 21); cada una de ellas se realizó por duplicado. El orden de los experimentos fue completamente aleatorizado.

Tabla 21. Matriz del diseño y plan de experimentación B

| No. | A | B | C | D | E | Temperatura (°C) | Cge (mg/L) | Tiempo (min) | Materia orgánica (mg/L) | Alcalinidad (mg/L) |
|-----|---|---|---|---|---|------------------|------------|--------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | - | - | - | - | - | 20 | 6 | 8 | 5 | 40 |
| 2 | - | - | - | + | + | 20 | 6 | 8 | 10 | 100 |
| 3 | - | - | + | - | + | 20 | 6 | 16 | 5 | 100 |
| 4 | - | - | + | + | - | 20 | 6 | 16 | 10 | 40 |
| 5 | - | + | - | - | + | 20 | 16 | 8 | 5 | 100 |
| 6 | - | + | - | + | - | 20 | 16 | 8 | 10 | 40 |
| 7 | - | + | + | - | - | 20 | 16 | 16 | 5 | 40 |
| 8 | - | + | + | + | + | 20 | 16 | 16 | 10 | 100 |
| 9 | + | - | - | - | + | 35 | 6 | 8 | 5 | 100 |
| 10 | + | - | - | + | - | 35 | 6 | 8 | 10 | 40 |
| 11 | + | - | + | - | - | 35 | 6 | 16 | 5 | 40 |
| 12 | + | - | + | + | + | 35 | 6 | 16 | 10 | 100 |
| 13 | + | + | - | - | - | 35 | 16 | 8 | 5 | 40 |
| 14 | + | + | - | + | + | 35 | 16 | 8 | 10 | 100 |
| 15 | + | + | + | - | + | 35 | 16 | 16 | 5 | 100 |
| 16 | + | + | + | + | - | 35 | 16 | 16 | 10 | 40 |

Cge: Concentración de ozono en la fase gas a la entrada al reactor

3.5.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS C

A partir de los resultados arrojados por el diseño de experimentos B, se decidió realizar nuevas pruebas en donde los factores a evaluar sólo fueran la temperatura y el tiempo de ozonización. La cantidad de materia orgánica y la alcalinidad adicionada al agua fueron los valores menos favorecedores de la prueba anterior, 10 y 100 mg/L respectivamente. Para este experimento, el diseño factorial utilizado fue 2^2 (Tabla 22 y 23).

Tabla 22. Factores y dominio experimental C

| Factor | Descripción | Niveles de factor | |
|--------|--------------------------|-------------------|-----------|
| | | Nivel (-) | Nivel (+) |
| A | Temperatura (°C) | 20 | 35 |
| B | Tiempo de contacto (min) | 15 | 25 |

Tabla 23. Matriz del diseño y plan de experimentación C

| No. | A | B | Temperatura (°C) | Tiempo (min) |
|-----|---|---|------------------|--------------|
| 1 | - | - | 20 | 15 |
| 2 | - | + | 20 | 25 |
| 3 | + | - | 35 | 15 |
| 4 | + | + | 35 | 25 |

Los resultados obtenidos de los diseños experimentales se sometieron a un análisis estadístico para evaluar la importancia de las variables involucradas en la inactivación de los huevos de nemátodos. El programa estadístico utilizado fue STATGRAPHICS Centurion y las gráficas fueron elaboradas con el software GraphPad Prism.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 EFECTO DEL OZONO SOBRE *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII*

Los huevos en estado viable presentaron una pared definida y, la estructura interna y externa se observaron integras (Figura 13). En algunos casos, incluso pudo observarse la larva en desarrollo en el interior del huevo como se muestra en la Figura 13-D y 13-E.



Figura 13. Huevos viables de *Meloidogyne enterolobii*

A, B y C: Huevos característicos de *M. enterolobii*. Son de forma ovalada, su tamaño oscila entre 89 y 103 μm de largo y 39 y 47 μm de ancho. D y E: Primer estadio juvenil (J1) se produce en el interior del huevo.

Los huevos sometidos al proceso de ozonización experimentaron cambios por la exposición al ozono, el cual oxidó y modificó los constituyentes de las envolturas de los nemátodos, la membrana perdió su integridad y con ello la viabilidad potencial del nemátodo. Lo anterior se traduce en: a) deformaciones y daños en la pared celular, b) fragmentación de la cubierta proteica, c) exposición del contenido de los huevos cuando el daño es severo. En cualquiera de estos casos, el estado de los huevos se calificó como un “estado no viable” (Figura 14).

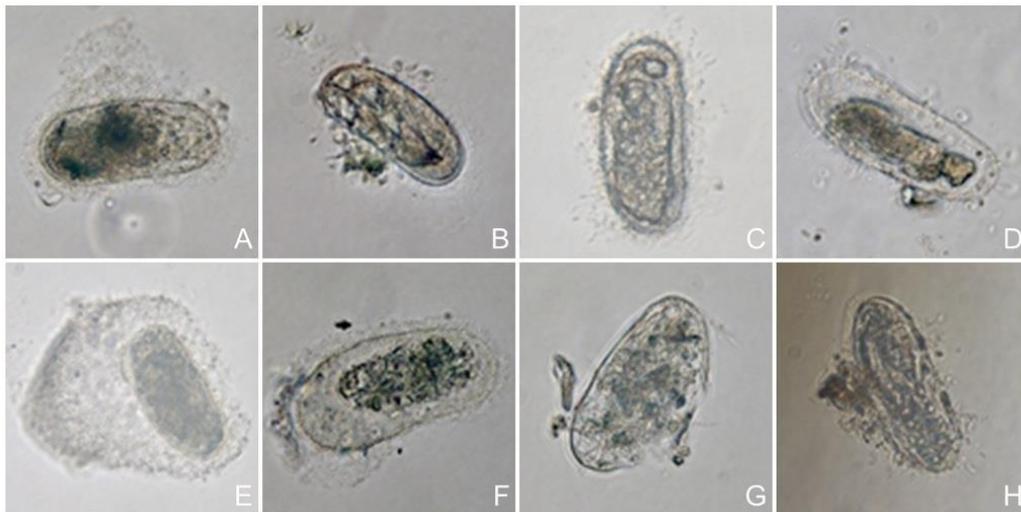


Figura 14. Huevos no viables de *Meloidogyne enterolobii*

A, E y H: Daño severo en la envoltura externa. B y D: Deformación de la envoltura externa. C y F: Desintegración por completo del huevo. G: Fragmentación de la cubierta proteica. En todos los casos se perdió viabilidad potencial. El desarrollo de los huevos se vio interrumpido por la acción del ozono y ya no es posible que lleguen a la etapa infecciosa.

4.2 ANÁLISIS DE OZONO

La demanda inmediata de ozono del agua sintética fue de 0.016 mg/L (Figura 15). Nava y Olivares (2011), reportan un valor similar, de 0.014 mg/L, para agua de pozo. Para agua superficial sin tratamiento, específicamente de río, se han reportado valores hasta 0.2 – 0.8 mg/L (Duguet, 1998).

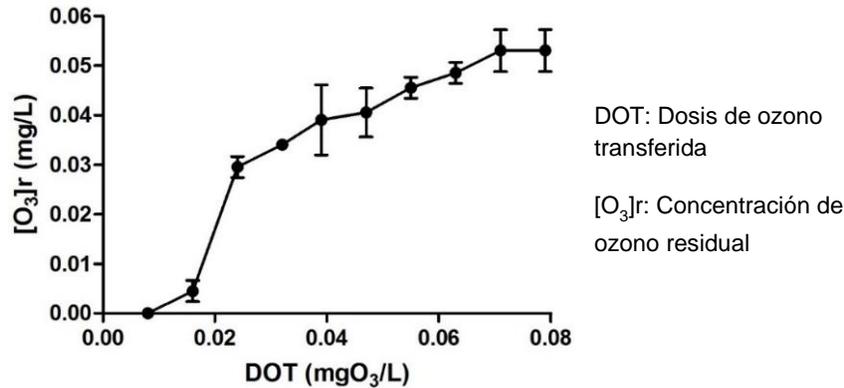


Figura 15. Demanda de ozono del agua sintética

En la Figura 16 se presentan las curvas de ozono residual en el agua ($[O_3]r$) que se obtuvieron utilizando diferentes concentraciones en fase gas, para agua destilada y agua sintética. Con los valores de concentración de ozono gas (C_{ge}) evaluados, se alcanzaron residuales de ozono entre 0.5 y 2.5 mgO₃/L. Las diferencias entre las curvas con agua destilada y agua sintética se deben a la demanda de ozono de los componentes presentes en el último caso. A mayor concentración de materia presente en agua, mayor demanda y, por lo tanto, menor concentración de ozono residual. Asimismo, cuando se ingresa una mayor concentración de ozono gas, la diferencia entre los valores de ozono residual es menor dado que es posible cubrir la demanda en un menor tiempo.

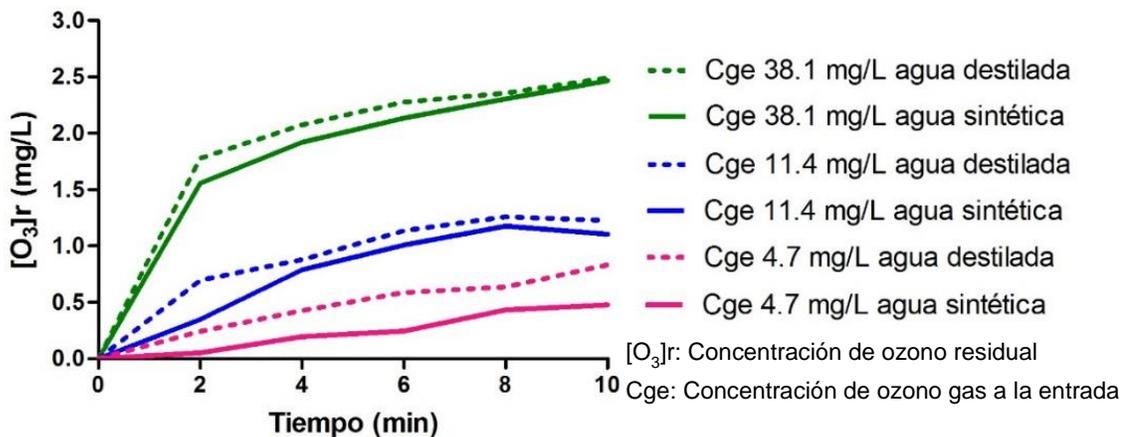


Figura 16. Concentración de ozono residual del agua sintética

A partir de estos resultados se establecieron las condiciones de concentración de ozono en fase gas a la entrada del reactor y los tiempos de contacto necesarios para alcanzar la concentración residual deseada para los ensayos de inactivación.

4.3 INACTIVACIÓN DEL NEMÁTODO *MELOIDOGYNE ENTEROLOBII* MEDIANTE EL PROCESO DE OZONIZACIÓN

4.3.1 ENSAYOS PRELIMINARES DE INACTIVACIÓN

Estos experimentos preliminares se realizaron con el propósito de ajustar las dosis y los tiempos de contacto del diseño de experimentos. Los resultados de inactivación bajo condiciones controladas de ozono residual (Prueba I) se muestran en la Tabla 24 y Figura 17. El mayor número de huevos inactivados se logra con valores altos de CT si se comparan con el CT necesario para inactivar el 99% quistes de *Giardia* (2.0 mg-min/L) (Clark et al., 1993). Por otro lado, el CT que inactivó el 80% de huevos de *M. enterolobii* (11 mg-min/L), se asemeja al que se requiere para inactivar 99% de *Cryptosporidium parvum* (10 mg-min/L) (Clark et al., 1993). Valores altos de CT, son indicativos de la resistencia a la desinfección de *M. enterolobii*.

De manera preliminar se destaca que el tiempo de contacto tiene mayor influencia en el porcentaje de inactivación que la concentración de ozono residual. Para un mismo valor de $[O_3]_r$, cuando el tiempo de contacto se duplica, y el número de nemátodos inactivados también aumenta.

Tabla 24. Resultados de la prueba preliminar I

| $[O_3]_r$ (mg/L) | Tiempo (min) | CT (mg-min/L) | Tasa de inactivación (%) |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| 0.42 | 5 | 2.1 | 20 |
| 0.42 | 10 | 4.2 | 40 |
| 1.10 | 5 | 5.5 | 40 |
| 1.10 | 10 | 11 | 80 |

$[O_3]_r$: concentración de ozono residual, CT: concentración de ozono residual x tiempo.

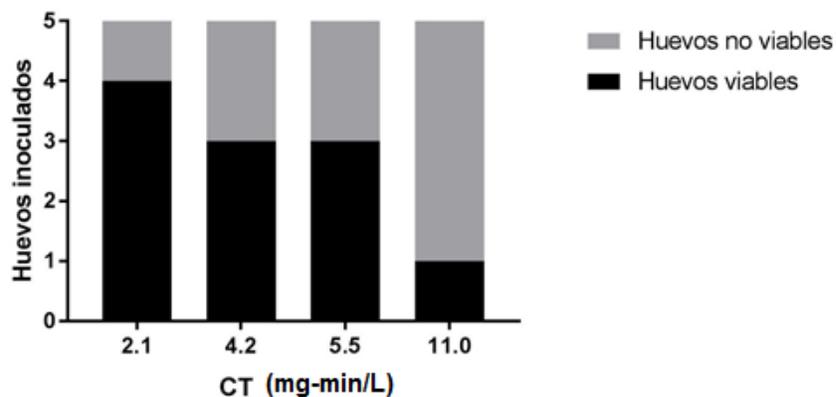


Figura 17. Resultados de la prueba preliminar I

En el segundo ensayo preliminar (Prueba II), donde se empleó el reactor de tanque agitado y agua destilada, además de evaluar la concentración de ozono residual y el tiempo de contacto, se varió la concentración de huevos. Dadas las combinaciones de $[O_3]_r$ y tiempo de contacto, se ensayaron tres valores de CT: 2.3, 5.7 y 14.3 mg-min/L. Los resultados de esta prueba se presentan en la Tabla 25 y en las gráficas de la Figura 18.

Tabla 25. Resultados de la prueba preliminar II

| [O ₃]r (mg/L) | Tiempo (min) | CT (mg-min/L) | Huevos inoculados (H/L) | Tasa de inactivación (%) |
|------------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0.57 | 4 | 2.3 | 5 | 40 |
| 0.57 | 4 | 2.3 | 20 | 65 |
| 0.57 | 10 | 5.7 | 5 | 80 |
| 0.57 | 10 | 5.7 | 20 | 90 |
| 1.43 | 4 | 5.7 | 5 | 80 |
| 1.43 | 4 | 5.7 | 20 | 60 |
| 1.43 | 10 | 14.3 | 5 | 100 |
| 1.43 | 10 | 14.3 | 20 | 100 |

[O₃]r: concentración de ozono residual, CT: concentración de ozono residual x tiempo.

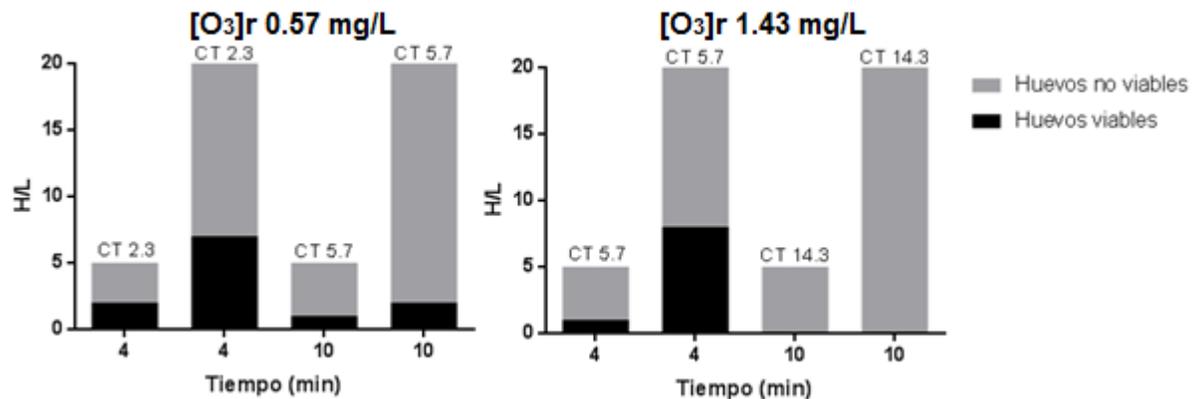


Figura 18. Resultados de la prueba preliminar II

Como era de esperarse, cuanto mayor es la concentración de ozono residual y mayor es el tiempo de contacto (valores altos de CT; 14.3 mg-min/L), la totalidad de los huevecillos logran inactivarse. Por el contrario, cuando el valor de CT es bajo (2.3 mg-min/L), ya sea porque la concentración de ozono residual o el tiempo son bajos, un número considerable de huevos aún permanece viables.

Por otra parte, resultados interesantes se obtuvieron en aquellos experimentos donde el valor de CT fue de 5.7 mg-min/L ([O₃]r 0.57 mg/L y tiempo de contacto de 10 min). Bajo estas condiciones, entre 80 y 90% de los huevos fueron inactivados. Estos resultados son comparables, e incluso pueden llegar a ser mejores, que aquellos que se obtuvieron para el mismo valor de CT (5.7 mg-min/L), compuesto por una [O₃]r mayor (1.43 mg/L), con un tiempo de contacto de 4 min.

Los resultados anteriores sugieren que no necesariamente se requiere de una concentración elevada de ozono residual, sino de un mayor tiempo de contacto para lograr el mayor porcentaje de inactivación de estos organismos. En el desarrollo del diseño de experimentos para la inactivación del nemátodo *M. enterolobii*, las condiciones encontradas en esta etapa ([O₃]r 0.57 mg/L y tiempo de contacto de 10 min) fueron consideradas.

4.3.2 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO RESIDUAL, TIEMPO DE CONTACTO Y NÚMERO DE HUEVOS

Los resultados se presentan en la Tabla 26 y gráficas de la Figura 19.

Tabla 26. Resultados del diseño de experimentos A

| No. | [O ₃]r (mg/L) | Tiempo (min) | CT (mg-min/L) | Huevos inoculados (H/L) | Tasa de inactivación (%) |
|-----|---------------------------|--------------|---------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 0.20 | 4 | 0.7 | 5 | 0 |
| 2 | 0.20 | 4 | 0.7 | 10 | 0 |
| 3 | 0.20 | 4 | 0.7 | 20 | 0 |
| 4 | 0.20 | 10 | 1.8 | 5 | 90 |
| 5 | 0.20 | 10 | 1.8 | 10 | 85 |
| 6 | 0.20 | 10 | 1.8 | 20 | 82.5 |
| 7 | 0.20 | 15 | 2.7 | 5 | 100 |
| 8 | 0.20 | 15 | 2.7 | 10 | 90 |
| 9 | 0.20 | 15 | 2.7 | 20 | 92.5 |
| 10 | 0.55 | 4 | 2.2 | 5 | 30 |
| 11 | 0.55 | 4 | 2.2 | 10 | 30 |
| 12 | 0.55 | 4 | 2.2 | 20 | 22.5 |
| 13 | 0.55 | 10 | 5.5 | 5 | 100 |
| 14 | 0.55 | 10 | 5.5 | 10 | 95 |
| 15 | 0.55 | 10 | 5.5 | 20 | 95 |
| 16 | 0.55 | 15 | 8.3 | 5 | 100 |
| 17 | 0.55 | 15 | 8.3 | 10 | 100 |
| 18 | 0.55 | 15 | 8.3 | 20 | 97.5 |
| 19 | 1.60 | 4 | 6.4 | 5 | 80 |
| 20 | 1.60 | 4 | 6.4 | 10 | 85 |
| 21 | 1.60 | 4 | 6.4 | 20 | 85 |
| 22 | 1.60 | 10 | 16.0 | 5 | 100 |
| 23 | 1.60 | 10 | 16.0 | 10 | 100 |
| 24 | 1.60 | 10 | 16.0 | 20 | 100 |
| 25 | 1.60 | 15 | 24.0 | 5 | 100 |
| 26 | 1.60 | 15 | 24.0 | 10 | 100 |
| 27 | 1.60 | 15 | 24.0 | 20 | 100 |

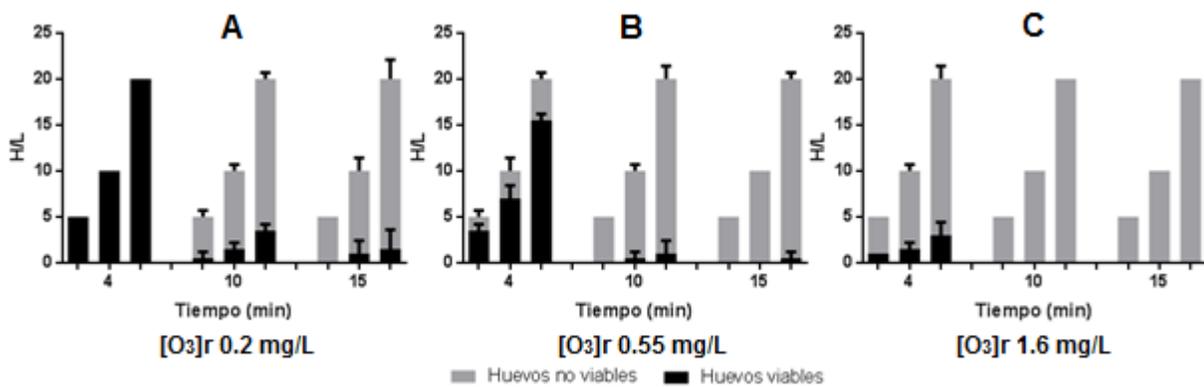


Figura 19. Resultados de las pruebas de inactivación

A partir de los resultados del diseño de experimentos A se destaca lo siguiente:

- Residuales de ozono de 0.2 mgO₃/L y tiempos de contacto de 4 min, no afectan la viabilidad del nemátodo. Bajo la misma concentración de ozono residual, pero aumentando el tiempo de exposición a 10 y 15 min, se logró la inactivación de un número significativo de huevos (Figura 19-A).
- Los resultados indican que con un valor de [O₃]r 0.55 mgO₃/L y tiempo de contacto de 10 min, se inactivó más del 95% de la población del nemátodo (Figuras 19-B).
- Aumentar el valor de [O₃]r implica un incremento en el porcentaje de inactivación; entre el 80 y 100% de los huevos que quedan inviables con [O₃]r igual 1.6 mg/L, a pesar de los tiempos de exposición cortos (Figura 19-C).

A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza (Tabla 27). Los resultados de este ANOVA indican que los factores significativos son la concentración de ozono residual (C) y el tiempo de contacto (B) y su interacción (CB). El tercer factor evaluado, concentración de huevos inoculados (A), resultó ser no significativo.

Tabla 27. Análisis de varianza (A)

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:H/L | 15.9233 | 1 | 15.9233 | 0.10 | 0.7560 |
| B:Tiempo | 24904.8 | 1 | 24904.8 | 152.82 | 0.0000 |
| C: [O ₃]r | 12790.4 | 1 | 12790.4 | 78.48 | 0.0000 |
| AB | 11.2654 | 1 | 11.2654 | 0.07 | 0.7938 |
| AC | 24.2216 | 1 | 24.2216 | 0.15 | 0.7016 |
| BC | 10688.1 | 1 | 10688.1 | 65.58 | 0.0000 |
| Error total | 7659.66 | 47 | 162.971 | | |
| Total (corr.) | 63570.8 | 53 | | | |

En la gráfica de efectos principales (Figura 20), se confirma que incrementar el tiempo de contacto y la concentración de ozono residual aumenta el porcentaje de inactivación. Por su parte, la gráfica de superficie (Figura 21) indica que, a tiempos de 15 min, residuales de ozono de 0.2 mg/L podrían ser suficientes para inactivar la totalidad de los huevos de nemátodos. Sin embargo, para asegurar la desinfección adecuada del agua, el valor de [O₃]r 0.55 mg/L es el más apropiado de acuerdo con lo establecido por Langlais (1988).

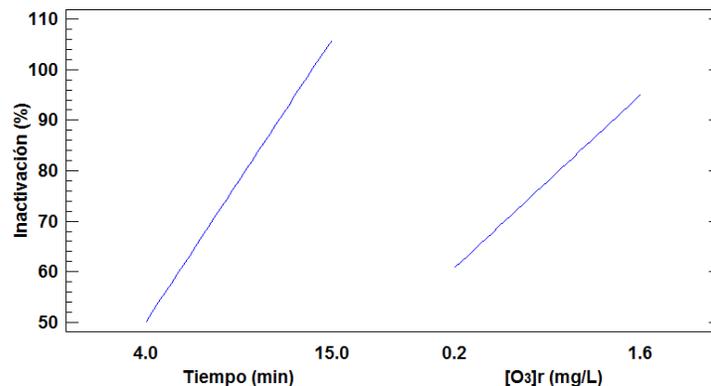


Figura 20. Gráfica de efectos principales (A)

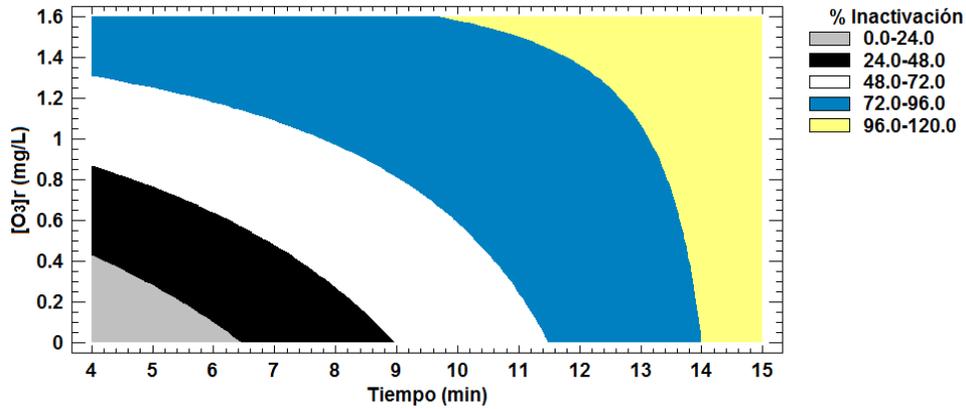


Figura 21. Superficie de contorno de Inactivación vs Tiempo y $[O_3]_r$

Los resultados anteriores muestran que el factor que tiene mayor relevancia sobre la tasa de inactivación de los huevos de *M. enterolobii* es el tiempo de contacto. A través de los ensayos realizados, fue posible inactivar los huevos de nemátodos con concentración de ozono residual cercanos a las condiciones estándar de desinfección con ozono ($[O_3]_r$ 0.4 mg O_3 /L por 4 min) aunque con un mayor tiempo de contacto, debido a la resistencia de *M. enterolobii*, lo cual ya ha sido reportado para otras especies del mismo género (Castagnone, 2012; Karuri, 2017).

4.3.3 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA Y TEMPERATURA

Los resultados donde se incorporaron la temperatura y composición del agua como variables para la inactivación de nemátodos se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Resultados del diseño de experimentos B

| No. | Temperatura (°C) | Cge (mg/L) | Tiempo (min) | Materia orgánica (mg/L) | Alcalinidad (mg/L) | Tasa de inactivación (%) |
|-----|------------------|------------|--------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 20 | 6 | 8 | 5 | 40 | 60 |
| 2 | 20 | 6 | 8 | 10 | 100 | 40 |
| 3 | 20 | 6 | 16 | 5 | 100 | 60 |
| 4 | 20 | 6 | 16 | 10 | 40 | 80 |
| 5 | 20 | 16 | 8 | 5 | 100 | 100 |
| 6 | 20 | 16 | 8 | 10 | 40 | 100 |
| 7 | 20 | 16 | 16 | 5 | 40 | 100 |
| 8 | 20 | 16 | 16 | 10 | 100 | 100 |
| 9 | 35 | 6 | 8 | 5 | 100 | 0 |
| 10 | 35 | 6 | 8 | 10 | 40 | 40 |
| 11 | 35 | 6 | 16 | 5 | 40 | 40 |
| 12 | 35 | 6 | 16 | 10 | 100 | 20 |
| 13 | 35 | 16 | 8 | 5 | 40 | 100 |
| 14 | 35 | 16 | 8 | 10 | 100 | 80 |
| 15 | 35 | 16 | 16 | 5 | 100 | 80 |
| 16 | 35 | 16 | 16 | 10 | 40 | 100 |

Cge: Concentración de ozono en la fase gas a la entrada al reactor

Los valores obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico para determinar la influencia de las variables evaluadas. La Tabla 29 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos y las interacciones. No hay un estimado de la variabilidad del muestreo puesto que no hay grados de libertad remanentes para estimar el error experimental. Debido a que no había grados de libertad para hacer contrastes, fue necesario reducir el número de efectos significativos mediante un análisis gráfico. A partir de un diagrama de Pareto (Figura 22), se puede concluir que el factor a ser eliminado es la materia orgánica (D) y las interacciones DE, CD, BD y AD. Debido a que el contenido de materia orgánica no pareció ser significativo, fue razonable esperar que tampoco contribuyera en las interacciones. Asimismo, también fueron candidatos a eliminar las interacciones CE y AC.

La materia orgánica conformada por ácidos húmicos y en la concentración utilizada para efectos de este estudio no mostró significancia sobre el porcentaje de inactivación de los huevos de nemátodos con ozono. Sin embargo, los desinfectantes tienden a ser menos efectivos en presencia de material orgánico ya que éste puede comportarse como una barrera que protege a los patógenos y evitar el contacto con el desinfectante. Al igual que con otros desinfectantes, previo a un proceso de ozonización, es necesario la aplicación de una operación unitaria que disminuya el contenido de material orgánico, para garantizar su efectividad, reducir la demanda inicial y la dosis de oxidante.

Tabla 29. Efectos estimados (B)

| Efecto | Estimado (%) | Error Estd. | V.I.F. |
|--------------------|--------------|-------------|--------|
| promedio | 68.75 | | |
| A:Temperatura | -22.5 | | |
| B:Cge | 52.5 | | |
| C:Tiempo | 7.5 | | |
| D:Materia orgánica | 2.5 | | |
| E:Alcalinidad | -17.5 | | |
| AB | 12.5 | | |
| AC | -2.5 | | |
| AD | 2.5 | | |
| AE | -7.5 | | |
| BC | -7.5 | | |
| BD | -2.5 | | |
| BE | 7.5 | | |
| CD | 2.5 | | |
| CE | 2.5 | | |
| DE | -2.5 | | |

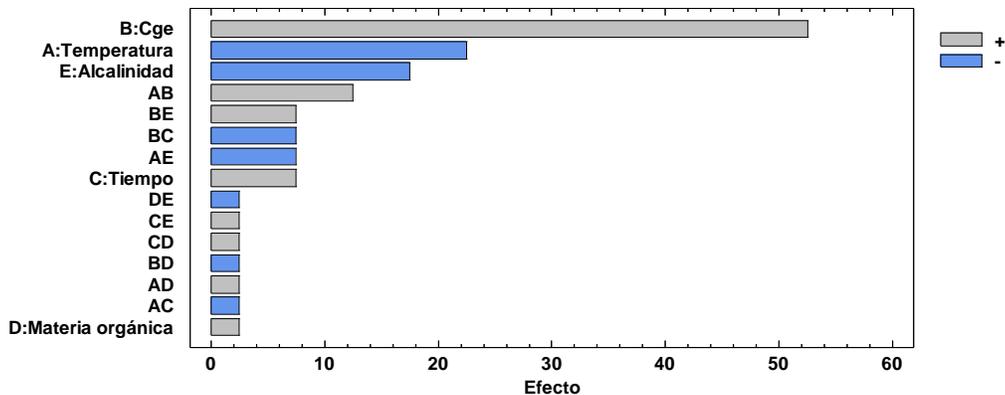


Figura 22. Diagrama de Pareto (B)

Otro gráfico que ayuda a discriminar entre efectos significativos y no significativos cuando no hay grados de libertad para hacer una prueba de ANOVA es el gráfico probabilístico normal (Figura 23). Este gráfico está diseñado para que los efectos no significativos aparezcan alineados alrededor del 0 (cada efecto estimado está dividido por su desviación típica). Los puntos más a la izquierda son los que tienen efectos (en valor absoluto) más bajos.

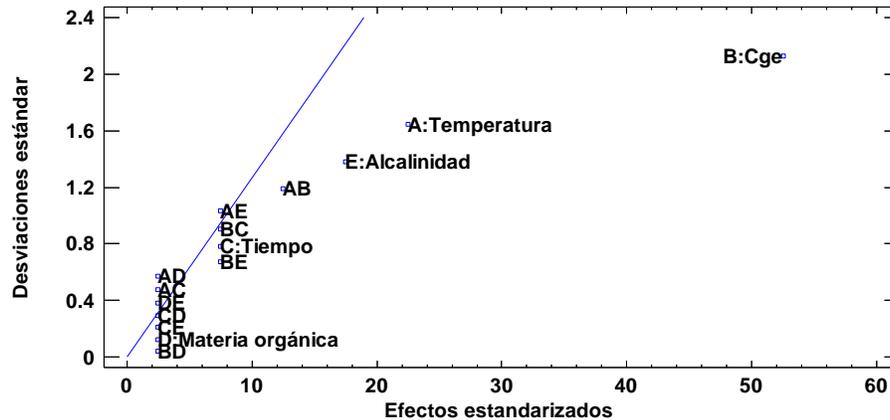


Figura 23. Gráfica mitad – normal (B)

Según el gráfico probabilístico normal, los efectos más distanciados de la recta que pasa por el 0, son los que pueden ser significativos. Los efectos significativos son la concentración de ozono a la entrada (B), la temperatura (A), la alcalinidad (E), el tiempo (C) y las interacciones AB, AE, BC y BE. Por tanto, para tener grados de libertad, primero se eliminaron algunos efectos del análisis y poder hacer el análisis de varianza que prueba la significancia estadística de cada efecto. La tabla inicial de ANOVA fue la siguiente (Tabla 30).

Tabla 30. Análisis de varianza I (B)

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:Temperatura | 2025.0 | 1 | 2025.0 | | |
| B:Cge | 11025.0 | 1 | 11025.0 | | |
| C:Tiempo | 225.0 | 1 | 225.0 | | |
| D:Materia orgánica | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| E:Alcalinidad | 1225.0 | 1 | 1225.0 | | |
| AB | 625.0 | 1 | 625.0 | | |
| AC | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| AD | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| AE | 225.0 | 1 | 225.0 | | |
| BC | 225.0 | 1 | 225.0 | | |
| BD | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| BE | 225.0 | 1 | 225.0 | | |
| CD | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| CE | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| DE | 25.0 | 1 | 25.0 | | |
| Error total | 0.0 | 0 | | | |
| Total (corr.) | 15975.0 | 15 | | | |

Se eliminó en primer lugar el efecto menos importante, que fue la materia orgánica. De igual forma se eliminaron las interacciones donde participó la materia orgánica y otras menos significativas, CE y AC. Luego de eliminar los efectos mencionados, resulta la Tabla 31. En este caso, ocho efectos tienen un valor P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 31. Análisis de varianza II (B)

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:Temperatura | 2025.0 | 1 | 2025.0 | 81.00 | 0.0000 |
| B:Cge | 11025.0 | 1 | 11025.0 | 441.00 | 0.0000 |
| C:Tiempo | 225.0 | 1 | 225.0 | 9.00 | 0.0199 |
| E:Alcalinidad | 1225.0 | 1 | 1225.0 | 49.00 | 0.0002 |
| AB | 625.0 | 1 | 625.0 | 25.00 | 0.0016 |
| AE | 225.0 | 1 | 225.0 | 9.00 | 0.0199 |
| BC | 225.0 | 1 | 225.0 | 9.00 | 0.0199 |
| BE | 225.0 | 1 | 225.0 | 9.00 | 0.0199 |
| Error total | 175.0 | 7 | 25.0 | | |
| Total (corr.) | 15975.0 | 15 | | | |

La interpretación de los resultados se puede realizar mediante la gráfica de efectos principales y de interacción (Figura 24 y 25). Estos gráficos y la Tabla 29 permiten destacar lo siguiente:

- La concentración de ozono gas que se alimenta al reactor (Cge) es el factor más importante para lograr tasas de inactivación altas, ya que aumentar su valor incrementa la inactivación 52.5%.
- A temperaturas de 35°C, el porcentaje de inactivación disminuye 22.5%.
- Alcalinidades bajas en el agua favorecen la inactivación de los nemátodos, promoviendo la inactivación 17.5%.
- La interacción Cge – tiempo de contacto (BC) indica que con concentraciones altas de ozono es posible reducir el tiempo para lograr los mismos porcentajes de inactivación.

La concentración de ozono a la entrada del sistema tiene una repercusión directa sobre la concentración de ozono disuelto, ya que, a una temperatura constante, ésta es función de la presión parcial del ozono gaseoso sobre el agua, por lo que existe más cantidad de ozono disponible que actúe sobre los nemátodos.

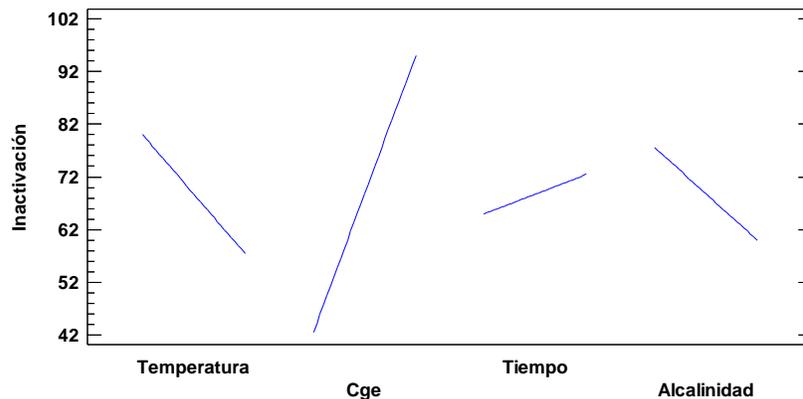
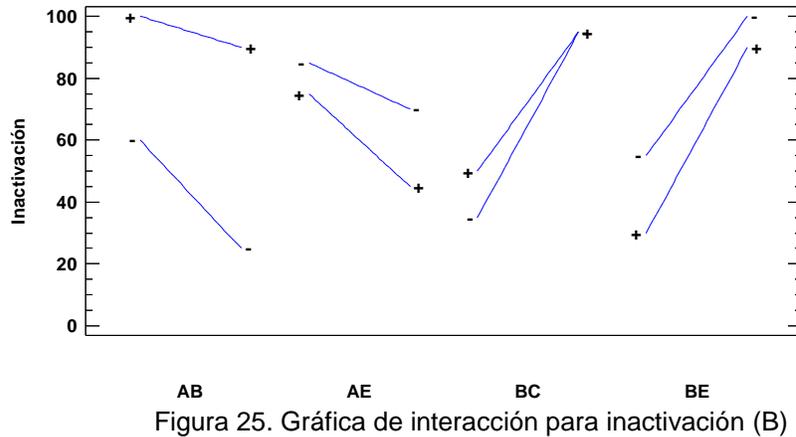


Figura 24. Gráfica de efectos principales para inactivación (B)



Dado que el ozono es solo parcialmente soluble en agua, y como sucede con la mayoría de los gases, su solubilidad aumenta a medida que la temperatura disminuye o la mezcla se presuriza (Ley de Henry). Por esta razón, se requiere una mayor dosificación de ozono (C_{ge}) a medida que aumenta la temperatura (Figura 26) para alcanzar una concentración de ozono residual igual a $0.55 \text{ mgO}_3/\text{L}$, con la cual se logró la inactivación a 20°C .

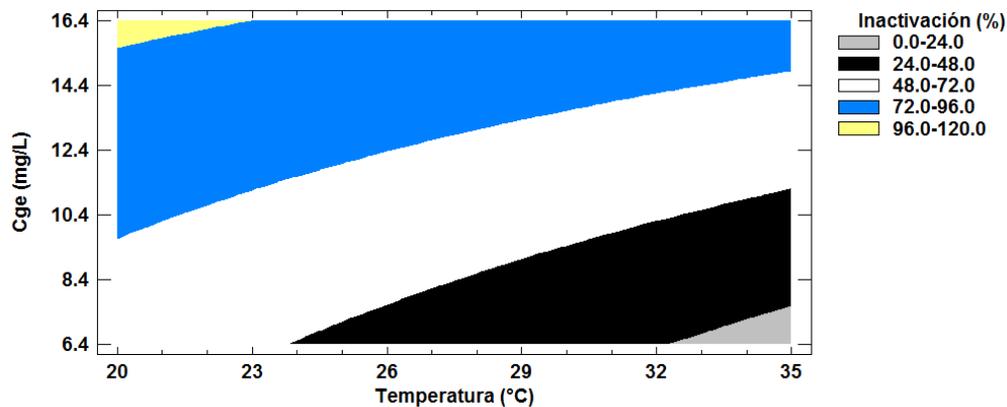


Figura 26. Superficie de contorno de Inactivación vs Temperatura y C_{ge}

4.3.4 INCREMENTO DE LA TASA INACTIVACIÓN

Con el objetivo de inactivar la totalidad de los microorganismos inoculados, se incrementó el tiempo de ozonización hasta 25 min. En este diseño en particular (Tabla 32), la concentración de ozono residual en el agua fue prácticamente la misma para todos los casos ($\sim 0.4 \text{ mgO}_3/\text{L}$).

Tabla 32. Resultados del diseño de experimentos C

| No. | Temperatura ($^\circ\text{C}$) | Tiempo (min) | Inactivación (%) | $[\text{O}_3]_r$ (mg/L) | CT |
|-----|----------------------------------|--------------|------------------|-------------------------|------|
| 1 | 20 | 15 | 100 | 0.38 | 5.8 |
| 2 | 20 | 25 | 100 | 0.37 | 9.4 |
| 3 | 35 | 15 | 85 | 0.42 | 6.3 |
| 4 | 35 | 25 | 100 | 0.43 | 10.8 |

$[\text{O}_3]_r$: concentración de ozono residual, CT: concentración de ozono residual x tiempo.

La prueba de ANOVA para este diseño de experimentos (Tabla 33) reafirmó que tanto la temperatura como el tiempo son factores significativos. A través de esta prueba también la interacción temperatura – tiempo (AB) se volvió significativa. En la Figura 27 se observa que al aumentar el tiempo de contacto es posible lograr la inactivación del 100% de los huevos del nemátodo *M. enterolobii* aun cuando la temperatura del medio se incremente hasta 35°C. Bajo esta condición, es necesario evaluar la conveniencia de ozonar durante 10 minutos más para inactivar el 15% restante de los nemátodos, dadas las implicaciones de costos de generación de ozono y lo requerimientos de infraestructura. Por otra parte, cuando la temperatura es de 20°C, 15 minutos de ozonización son suficientes para lograr la totalidad de la inactivación.

Tabla 33. Análisis de varianza (C)

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:Temperatura | 112.5 | 1 | 112.5 | 9.00 | 0.0399 |
| B:Tiempo | 112.5 | 1 | 112.5 | 9.00 | 0.0399 |
| AB | 112.5 | 1 | 112.5 | 9.00 | 0.0399 |
| Error total | 50.0 | 4 | 12.5 | | |
| Total (corr.) | 387.5 | 7 | | | |

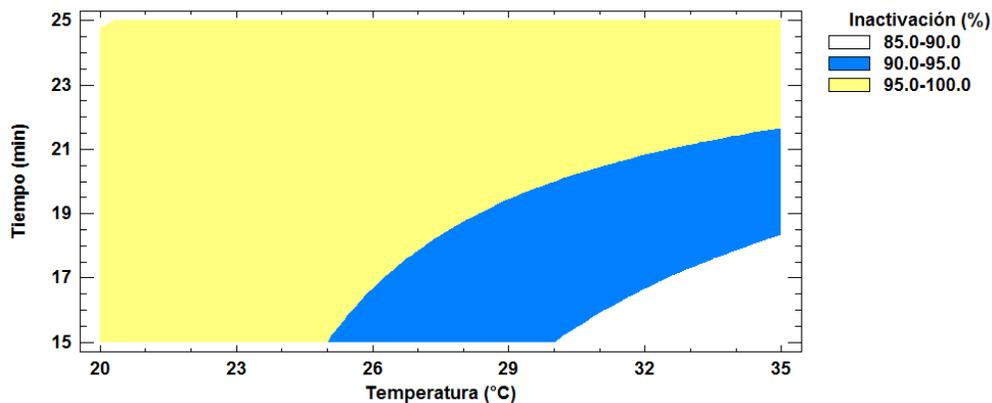


Figura 27. Superficie de contorno de Inactivación vs Temperatura y Tiempo

Referente al balance de masa de ozono (Tabla 34), la dosis de ozono aplicada (DOA) se incrementa considerablemente, alrededor de 2.5 veces más cuando la temperatura es de 35°C en comparación con la de 20°C, esto como resultado de la baja solubilidad de ozono a temperaturas elevadas, además de las limitaciones de transferencia de masa que se tuvieron con el reactor. Si se toma en cuenta que la dosis de ozono transferida (DOT) para alcanzar un residual de ozono en el agua igual a 0.4 ± 0.03 mg/L, en todos los casos es de 6.65 ± 0.2 mgO₃/L, significa que a temperaturas elevadas se tienen pérdidas de ozono importantes. A pesar de que en el contactor utilizado de tanque agitado se alcanzan porcentajes de transferencia entre el 20 – 30%, por ejemplo, para el caso 4, el ozono que no está reaccionando y se está perdiendo llega a ser el 94% de la cantidad inyectada.

Tabla 34. Balance de ozono (C)

| No. | Temperatura (°C) | Tiempo (min) | DOA (mgO ₃ /L) | DOT (mgO ₃ /L) | ET (%) |
|-----|------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 20 | 15 | 27.7 | 6.6 | 24 |
| 2 | 20 | 25 | 40.2 | 6.8 | 17 |
| 3 | 35 | 15 | 67.0 | 6.8 | 10 |
| 4 | 35 | 25 | 100.4 | 6.4 | 6 |

DOA: dosis de ozono aplicada, DOT: dosis de ozono transferida, ET: eficiencia de transferencia.

A partir de los experimentos realizados y los resultados obtenidos se concluye que el factor más relevante para lograr la inactivación de los huevos de *M. enterolobii* es el tiempo. No fue posible disminuir los tiempos de contacto sin que la concentración de ozono residual se elevará considerablemente y, aunque experimentalmente se puede realizar en laboratorio, al escalar el proyecto a piloto, mantener un residual de ozono en el agua por arriba de 1.0 mg/L no es lo más recomendable por los requerimientos de operación que esto conllevaría.

Los tiempos de contacto elevados se deben principalmente a la resistencia que posee *Meloidogyne* spp. (Castagnone, 2012). Particularmente, los huevecillos de nemátodo se caracterizan por ser altamente resistentes debido a su composición estructural que consiste de tres cubiertas (lipídica, quitosina y vitelina; Solís, 2009); lo que les confiere una gran capacidad de supervivencia y los hace uno de los microorganismos más resistentes a los desinfectantes (McDonnell, 2007). Lo anterior se traduce en un elemento que afecta la velocidad de reacción con el ozono por lo que la oxidación para este microorganismo es lenta.

Para lograr el 100% de inactivación de una población de hasta 20 huevos de nemátodo por litro en agua sintética, a una temperatura de 20°C, se determinó que se requiere de una concentración de ozono residual de 0.55 mgO₃/L y un tiempo de contacto 15 min (CT: 8.25 mg-min/L). En general, los valores reportados para la inactivación de nemátodos con ozono se caracterizan por ser altos. Los tiempos de exposición oscilan entre 12 y hasta 60 min mientras que, los valores de CT varían de 8 a 12 mg-min/L (Moens et al., 1991; Runia y Amsing, 1996; Sánchez et al., 2007).

De acuerdo con Langlais et al. (1991), la eficacia del proceso de desinfección depende del microorganismo específico, así como de los valores de tiempo de contacto. Por ejemplo, los ooquistes de *Cryptosporidium* están catalogados como uno de los más resistentes al ozono (US EPA, 1999). Se tienen en la literatura una amplia gama de valores de CT para el mismo nivel de inactivación que van de 4.0 hasta 10.0, principalmente debido a los diferentes métodos de las mediciones empleadas, el pH, la temperatura y las condiciones de ozonización (Clark et al., 1993). Valores similares a los obtenidos en este estudio han sido reportados bajo las siguientes condiciones: operación en lote y flujo continuo de gas. Finch et al. (1994) inactivaron el 99% de ooquistes de *C. parvum* con un residual de ozono de 0.50 durante 18 min a 7°C. Por su parte, Korich et al. (1990) lo hicieron con una [O₃]_r de 1.0 por 10 min a 25°C.

En cuanto a los factores que se evaluaron para determinar si afectaban la tasa de inactivación de los nemátodos, a partir del análisis de varianza, se determinó que la materia orgánica no fue uno de ellos. Sin embargo, la materia orgánica ejerce una demanda de ozono al iniciar el proceso, por lo que la dosis de ozono aplicada (DOA) deberá de ajustarse conforme a la calidad que tenga el agua. Cabe señalar que, con la finalidad de obtener un valor fiel de CT, se ozonizó el agua inicialmente durante 6 – 8 min para alcanzar una condición de equilibrio de ozono residual en el agua, por lo que la demanda de ozono fue cubierta durante este tiempo. Pese a lo anterior, el tipo de materia orgánica y concentración utilizada en este estudio no representó una variable significativa que afectara la tasa de inactivación.

Referente al factor temperatura, a medida que ésta aumenta se requiere una mayor dosificación de ozono para mantener la concentración de ozono disuelto necesaria (0.55 mgO₃/L) y lograr la inactivación deseada. Aunque el valor CT de 8.25 mg-min/L se mantenga a 35°C, los porcentajes de desinfección llegan a reducirse un 22.5%. Esto podría deberse a que a altas temperaturas la velocidad de desorción del ozono es mayor que la de oxidación del ozono sobre los microorganismos. En el caso contrario, cuando la temperatura se mantiene baja (~20°C), la eficiencia de transferencia del ozono es mayor y éste se encuentra más disponible para actuar sobre los microorganismos. Bajo las condiciones experimentales, se determinó que la tasa de inactivación no era independiente de la temperatura.

Las condiciones de inactivación para *Meloidogyne enterolobii* encontradas en este estudio son un primer acercamiento para su aplicación en el tratamiento de un agua de riego real bajo condiciones naturales en el sitio. Como un primer punto, se deben hacer los ajustes necesarios en la dosis de ozono y los tiempos de contacto, preferentemente empleando un reactor escala piloto que opere en modo continuo. Se prevé un incremento en la dosificación de ozono considerando los cambios en la calidad y la temperatura del agua. Se recomienda la aplicación del ozono después de la etapa de filtración que generalmente se tiene instalada en los campos agrícolas con sistema de riego a presión. Esto contribuirá a una mejor efectividad y a reducir la demanda de ozono. Probablemente también se modifique el tiempo de contacto por posibles cortos circuitos hidráulicos en el contactor gas-líquido. Se espera que mientras se mantenga la concentración del ozono residual (0.55 mgO₃/L; una vez cubierta la demanda) durante un periodo de tiempo mínimo de 15 min, se logrará la inactivación de los nemátodos presentes.

4.4 DISEÑO CONCEPTUAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO

El esquema general del manejo de agua utilizado por algunas empresas agrícolas mexicanas donde se cultiva tomate se muestra en la Figura 28. Incluye un cárcamo o bien estanques de almacenamiento de agua superficial, a partir de los cuales el agua se bombea a un sistema de filtración conformado por filtros de arena, de anillos o ambos; el número de filtros instalados depende del tamaño de la agrícola. El objetivo principal de la filtración es reducir los sólidos presentes para evitar taponamientos en el sistema de riego. En algunos casos, se inyecta cloro como medida de desinfección. Posteriormente, se dosifican los nutrientes y finalmente, el agua es orientada para la irrigación de los cultivos. Con el sistema de filtración y desinfección no se logra evitar la contaminación de los cultivos causada por *Meloidogyne enterolobii*.

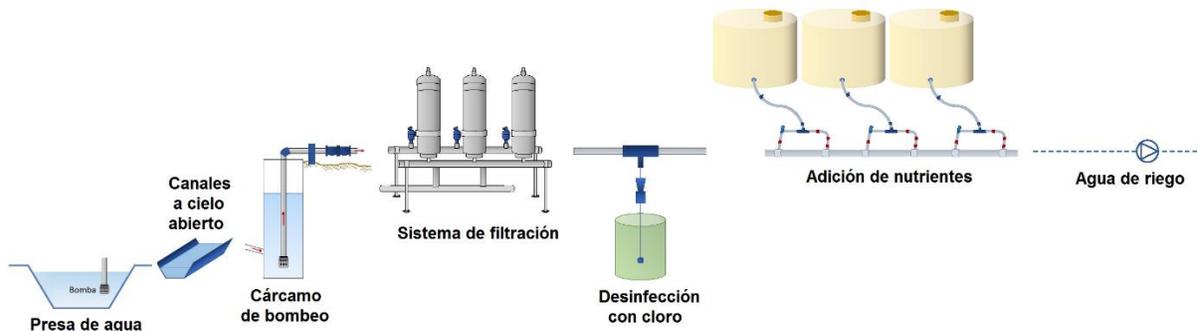


Figura 28. Tratamiento de agua de riego

Con base en los resultados de inactivación obtenidos en el presente trabajo de tesis, se propone el uso de ozono como medida de control de la presencia del nemátodo en el agua de riego. Como parte del diseño conceptual del sistema de tratamiento del agua para riego, se plantea sustituir la cloración por el proceso de ozonización e integrarlo después del sistema filtración y antes de la adición de nutrientes (Figura 29), con el fin de reducir la demanda de ozono y mejorar su efectividad.

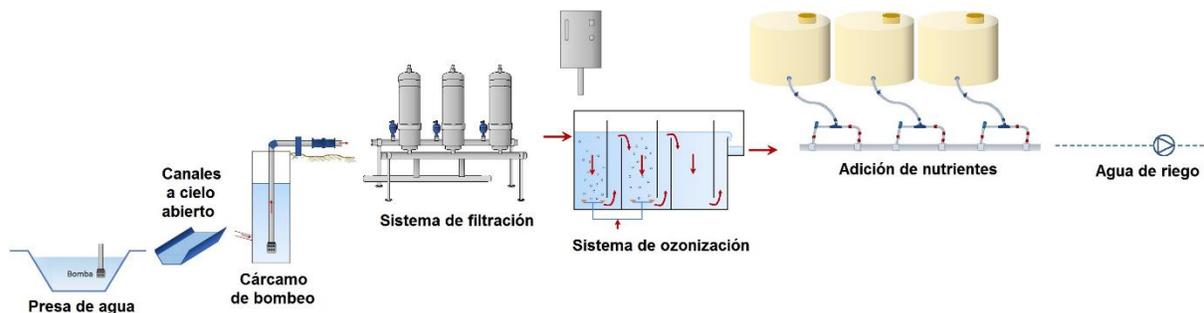


Figura 29. Tratamiento con ozono de agua de riego

Si bien el objetivo de la filtración es evitar taponamiento en los emisores de riego y daños a lo largo del sistema, se prevé que en esta etapa los niveles de materia se reduzcan y con ello la demanda de ozono. Adicionalmente, la reducción de partículas en suspensión contribuye a evitar que los organismos patógenos la utilicen como una barrera de protección haciendo que el proceso de desinfección sea más efectivo. Cuanto menor sea la demanda inicial, menor será la dosis para alcanzar un determinado nivel de desinfección. Por lo anterior, se recomienda aplicar el ozono posterior a la filtración y previo a la incorporación de fertilizantes.

4.5 FACTIBILIDAD TÉCNICA

Como parte de la factibilidad técnica se establecieron los requerimientos generales de equipo, dimensionamiento de contactor gas-líquido y condiciones de operación del sistema de ozonización. La propuesta de integración de un sistema de ozonización al tratamiento del agua de riego para el cultivo de tomate y la evaluación de factibilidad técnica consideraron los siguientes aspectos:

- La condición de tratamiento para lograr el 100% de inactivación, es decir, mantener una concentración de ozono residual igual a 0.55 mg/L durante 15 min.
- Los resultados obtenidos a escala laboratorio se tomaron en cuenta para el cálculo de la dosificación de ozono suponiendo una eficiencia de transferencia del 90%.
- Para determinar los requerimientos de agua y ozono, así como las dimensiones y tamaños de los equipos, se tomó como ejemplo una zona agrícola con las siguientes características:
 - Superficie de cultivo: 24 hectáreas
 - Volumen de agua empleado: 25 m³/ha/día
 - Tiempo de irrigación: 40 min/día
 - Tasa de riego: 10 L/ha/s

4.5.1 COMPONENTES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO CON OZONO

Para los fines de esta tesis, se consideraron solo los componentes principales de un sistema de tratamiento con ozono: sistema de gas de alimentación, generador de ozono y contactor gas-líquido (Figura 30).

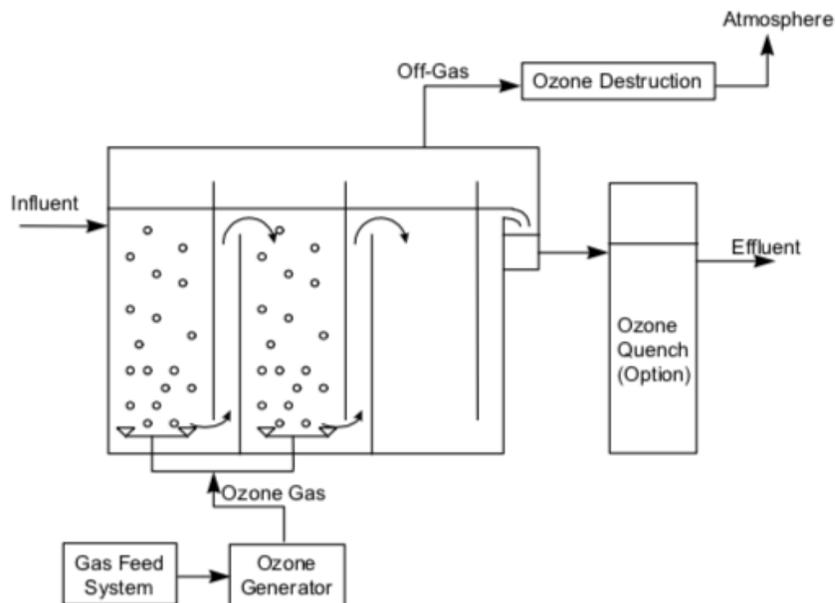


Figura 30. Componentes principales de un sistema de ozonización
Fuente: U.S. EPA, 1999.

4.5.2 GENERACIÓN DE OZONO Y GAS DE ALIMENTACIÓN

Para aplicaciones industriales se utilizan generadores de descarga en corona. Esta tecnología proporciona la forma más eficiente y económica de producir ozono. La selección del “gas de alimentación”, el cual puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno u oxígeno puro, afecta la producción de ozono y los costos del proceso (Tabla 35).

Tabla 35. Producción de ozono a escala industrial

| Parámetro | Unidades | Gas de alimentación | | |
|-------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------|---|
| | | Aire | Oxígeno puro | Mezcla de gases con diferentes concentraciones de oxígeno |
| Concentración de ozono | gO ₃ /m ³ | Hasta 40 | 60 – 300 | Hasta 100 |
| Capacidad de producción | kgO ₃ /h | 0.001 – 130 | Hasta 130 | Hasta 25 |
| Demanda de energía | kWh/kgO ₃ | 7 - 18 | 7 – 17 | |

Fuente: Bin and Roustan, 2000.

4.5.3 REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN OZONO

Los requerimientos de producción de ozono se estiman a partir de la dosis de ozono necesaria para lograr la inactivación del nemátodo y el flujo de agua a tratar el cual depende a su vez del nivel utilizado en las agrícolas productoras de tomate (~10 L/ha/s). Teniendo en cuenta los requerimientos de ozono para la inactivación del nemátodo (demanda y residual de ozono 0.55 mgO₃/L) y considerando una eficiencia de transferencia de masa de ozono a alcanzar del 90% en el contactor de burbuja fina, se realizaron los cálculos respectivos de producción de ozono (g/h) para una agrícola productora de tomate de tamaño medio (~24 ha).

En la Tabla 36 se presenta la capacidad de producción de ozono necesaria para diferentes escenarios de áreas de irrigación y el área total (24 ha). Se decidió hacer este ejercicio (Tabla 36) con la finalidad de optimizar las condiciones del proceso tratamiento, adecuado a las condiciones de riego ya que en las agrícolas no se realiza el riego del total de las hectáreas sembradas al mismo tiempo. Lo anterior permite el diseño de sistemas de tratamiento menos robustos en cuanto al tamaño de las instalaciones y capacidad de los equipos.

Tabla 36. Requerimientos de agua y ozono

| Área de irrigación | Flujo de agua (L/s) | Producción de O ₃ (g/h) |
|--------------------|---------------------|------------------------------------|
| 1 ha | 10 | 38 |
| 2 ha | 20 | 77 |
| 3 ha | 30 | 115 |
| 4 ha | 40 | 153 |
| 6 ha | 60 | 230 |
| 24 ha | 240 | 920 |

Con base en los requerimientos de producción de ozono, se realizó una búsqueda de equipos de generación disponibles en el mercado y se seleccionaron tres marcas proveedoras y sus respectivos modelos (Tabla 37).

Tabla 37. Generadores de ozono disponibles en el mercado

| Ozono Polaris | | GE Osmonics | | Pacific ozone | |
|---------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Modelo | Producción (gO ₃ /h) | Modelo | Producción (gO ₃ /h) | Modelo | Producción (gO ₃ /h) |
| 1-001 | 19 | EO3-1 SYS | 19.0 | 3M23 | 175 |
| 1-002 | 38 | HC-02O | 37.5 | 3M24 | 210 |
| 1-003 | 57 | HC-03O | 56.6 | 6M23 | 350 |
| 1-004 | 76 | HC-04O | 75.0 | 6M24 | 420 |
| 1-005 | 95 | HC-05O | 94.0 | 9M23 | 525 |
| 1-007 | 133 | HC-08O | 151 | 9M24 | 630 |

Para seleccionar el equipo de generación adecuado, además de cubrir con la demanda de producción, es importante tomar en cuenta, el costo del equipo, el consumo de energía, así como los requerimientos de gas de alimentación para la generación de ozono. De las marcas seleccionadas no hay un generador capaz de producir el ozono suficiente para tratar el gasto total de agua (240 L/s). Una alternativa para tratar dicho gasto es considerar la instalación de dos generadores (“Pacific Ozone” Modelos 9M23 o 9M24) para cubrir la demanda total de generación de ozono con las implicaciones de costo e infraestructura que esto conlleva.

En este trabajo se propone implementar el proceso de desinfección con ozono sobre la base de un sistema de riego seccionado. Teniendo en cuenta que el agua es un recurso cada vez más escaso y que la agricultura es la actividad que más consume este elemento, se sugiere efectuar el riego en las primeras horas de la mañana o últimas de la tarde, o incluso por la noche, en lugar de hacerlo a mediodía para evitar la evaporación del agua. Para cubrir el total de 24 ha, tratando un caudal de agua de 30 L/s, que corresponde a la irrigación de 3 ha, se tiene que realizar esta acción 8 veces tomando en cuenta las prácticas de riego. De esta forma se requerirá de un generador de ozono con capacidad de producción de al menos 115 gO₃/h. Los equipos de generación: Ozono Polaris 1-007, GE Osmonics HC-08O y Pacific Ozone 3M23, cubren dicha demanda de producción de ozono (Tabla 38, Anexo II).

Tabla 38. Especificaciones de los generadores de ozono del mercado

| Marca | Modelo | Gas de alimentación | Producción de ozono | Requerimientos eléctricos |
|---------------|--------|---------------------|------------------------|---------------------------|
| Ozono Polaris | 1-007 | Aire | 133 gO ₃ /h | Información no disponible |
| GE Osmonics | HC-08O | Oxígeno | 151 gO ₃ /h | 60 Hz: 460 – 480 VAC 3P |
| Pacific Ozone | 3M23 | Oxígeno | 175 gO ₃ /h | 1Ø, 240VAC, 20A, 50/60Hz |

4.5.4 REACTOR DE BURBUJA FINA

La selección del tipo de reactor o contactor G-L depende del régimen de reacción. En una reacción lenta o moderada, la reacción del ozono tiene lugar en el seno del líquido y requiere de tiempos de retención relativamente largos. Para estos casos el reactor de burbuja fina es el más apropiado por el volumen de agua a tratar y por el tiempo de retención hidráulica que se puede manejar. Algunas de sus características son (Bin and Roustan, 2000).

- El gas se dispersa en forma de burbujas de 2-3 mm de diámetro mediante placas porosas
- Existen diferentes arreglos de baffles
- Número de compartimientos: 3 – 6
- Altura del nivel del agua: 4 – 7 m
- Tiempo de residencia promedio: 6 – 20 min
- Volumen de tanque: 80 – 500 m³
- Eficiencia de transferencia de masa: 72 – 92%

En este caso de estudio, se demostró que el factor más importante fue el tiempo de contacto para la inactivación del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* en agua de riego agrícola. Por esta razón, se propone utilizar un contactor de burbuja fina para garantizar el tiempo de residencia necesario para lograr la inactivación.

Con base en los resultados obtenidos, se hicieron los cálculos respectivos para el dimensionamiento del contactor (Tabla 39) y las condiciones de operación. Las dimensiones del contactor se calcularon con base en un flujo de agua a tratar de 30 L/s y un tiempo de retención hidráulica de 15 min. Para el diseño del contactor se tomó en cuenta una demanda inicial de ozono de 0.016 mg/L y una constante de descomposición del ozono en el agua (k^*) de 0.065 min⁻¹ (Nava y Olivares, 2011). El reactor propuesto se compone de 3 compartimientos con dobles deflectores interiores para garantizar la transferencia de ozono. En la primera cámara se satisface la demanda inicial de ozono que presenta el influente y comienza el proceso de inactivación.

Tabla 39. Características del contactor G-L

| | | |
|---|--------------------------|-------|
| Flujo volumétrico de agua (Q _L) | 30 L/s | |
| Relación gas – líquido (Q _G /Q _L)* | 0.15 | |
| Flujo volumétrico de ozono (Q _G) | 4.5 L/s | |
| Tiempo de retención hidráulica (TRH) | 15 min | |
| Volumen del contactor G-L | 30 m ³ | |
| Número de etapas | 3 | |
| TRH por etapa | 5 min | |
| Dimensiones del contactor | Altura (H) | 4.0 m |
| | Ancho (A) | 2.5 m |
| | Longitud (L) | 3.0 m |
| Producción de ozono | 115 gO ₃ /h | |
| Dosis de ozono aplicada (DOA) | 1.0 mgO ₃ /L | |
| Dosis de ozono transferida (DOT) | 0.85 mgO ₃ /L | |

*La relación Q_G/Q_L recomendada por Langlais et al. (1991) es 0.02 – 0.5.

La siguiente expresión $C_n = C_{n-1} \times e^{(TRH_n \times k^*)}$ (Rakness, 2005), permite realizar el cálculo de los valores de la concentración de ozono residual que tendrá el agua al final de cada etapa (Figura 31). Para asegurar una [O₃]_r de 0.5 mgO₃/L hasta la etapa final del reactor, debido a la constante de descomposición y suponiendo una eficiencia de transferencia del 90%, la cantidad de ozono a aplicar en la primera cámara es de 1.0 mg/L.

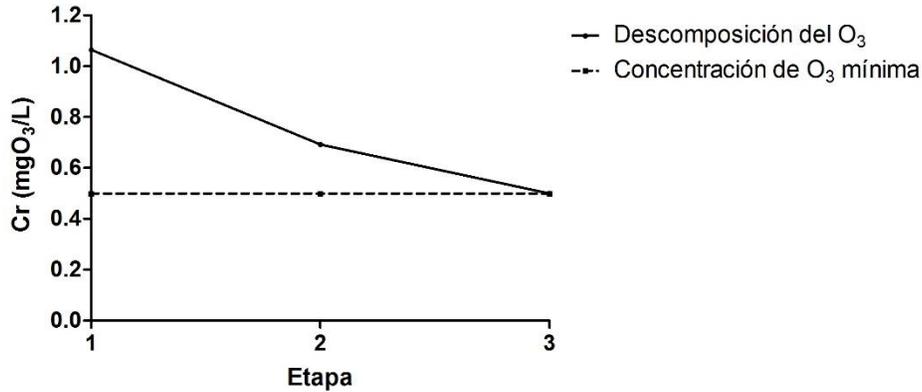


Figura 31. Concentración de ozono residual dentro del contactor G-L

La Figura 32 es la representación del contactor G-L propuesto. Para conseguir un buen contacto entre el ozono y el agua, el ozono ingresará en el fondo de la cámara a través de difusores de burbuja fina mientras que el agua lo hará por la parte superior. La función de los deflectores es aumentar el paso del agua y evitar los cortos circuitos. Para lograr la inactivación del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* en el reactor de burbuja fina, la dosis inicial de ozono (1.06 mgO₃/L) satisfará la demanda de ozono del agua (0.016 mg/L). Una vez satisfecha esta demanda, será necesario mantener 0.5 mg/L de ozono disuelto en el agua durante 15 minutos.

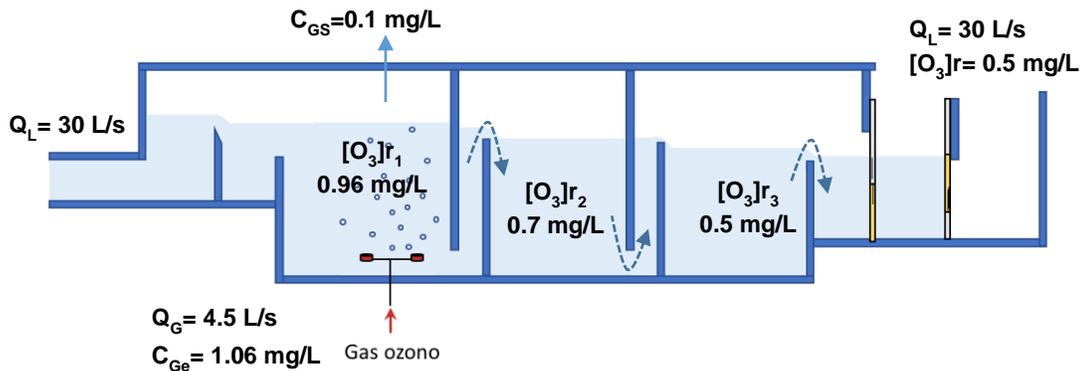


Figura 32. Diseño de la cámara de contacto y balance de ozono

- QL: Flujo de agua
- QG: Flujo de gas ozono
- CGe: Concentración de ozono en la fase gas a la entrada del reactor
- CGs: Concentración de ozono en la fase gas a la salida del reactor
- [O₃]r₁: Concentración de ozono residual en el agua en la cámara 1
- [O₃]r₂: Concentración de ozono residual en el agua en la cámara 2
- [O₃]r₃: Concentración de ozono residual en el agua en la cámara 3
- [O₃]r: Concentración de ozono residual en el agua a la salida del reactor

4.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS

La tecnología del ozono generalmente no es considerada asequible, sin embargo, es muy efectiva y, a veces, es el único método que funciona. Si otros procesos de desinfección no son satisfactorios, la eficacia se convierte en la principal consideración al calificar el costo del tratamiento. Para la estimación del costo de capital (Tabla 40) y operación y mantenimiento (Tabla 41) de un sistema de ozonización se utilizó el procedimiento descrito en *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering* (Langlais et al., 1991; Anexo III).

4.6.1 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CAPITAL

Tabla 40. Costos de capital estimados

| | | | |
|--|--|---------|---------------------|
| 1. Diseño | Flujo de agua | 108 | m ³ /h |
| | Dosis de ozono | 1.0 | mg/L |
| | Producción de ozono | 0.110 | kgO ₃ /h |
| | Capacidad de generación instalada ⁽¹⁾ | 0.140 | kgO ₃ /h |
| 2. Costo del equipo de ozonización ⁽²⁾ | | 7,986 | USD/kg/día |
| 3. Costo proyectado del equipo | | 26,833 | USD |
| 4. Tiempo de retención hidráulico | | 15 | min |
| 5. Costo proyectado del contactor ⁽³⁾ | | 480,000 | USD |
| 6. Área estimada de construcción ⁽⁴⁾ | | 0.02 | m ² /g/h |
| 7. Área de construcción calculada | | 3.0 | m ² |
| 8. Costo estimado de construcción ⁽⁵⁾ | | 300 | USD/m ² |
| 9. Costo proyectado de construcción | | 900 | USD |
| 10. Costo total estimado del sistema de ozonización | | 507,733 | USD |
| 11. Costo unitario estimado del sistema de ozonización | | 169,245 | USD/ha |

⁽¹⁾ Se asume que el generador de O₃ trabajará al 80% de la capacidad nominal.

⁽²⁾ Para saber este valor se utiliza la Figura 34. El valor mínimo de producción de O₃ en la gráfica es de 1.89 kg/h.

⁽³⁾ Para identificar este valor en la Figura 35 se requiere del flujo de agua cuyo valor mínimo es de 156 m³/h.

⁽⁴⁾ De la Figura 36 se seleccionó la curva de espacio mínimo.

⁽⁵⁾ En México, el precio del m² construido es de 6,000 pesos.

En las estimaciones de costo capital están considerados los equipos de tratamiento de aire, generador de ozono, destrucción de ozono, tuberías, válvulas, instrumentación, difusores de placa porosa, sistema de control e instalación.

4.6.2 ESTIMACIÓN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Tabla 41. Costos de operación y mantenimiento

| | | | |
|--|---------------------------|------|--------------------|
| 1. Producción de ozono | Flujo anual promedio | 100 | m ³ /h |
| | Dosis anual promedio | 0.9 | mg/L |
| | Producción anual promedio | 0.09 | kg/h |
| 2. Energía específica estimada requerida por el sistema ⁽¹⁾ | | 25 | kWh/kg |
| 3. Promedio de energía consumida por día | | 54 | kWh/día |
| 4. Costo estimado de energía ⁽²⁾ | | 0.1 | USD/kWh |
| 5. Costo promedio de energía por día | | 5.4 | USD/día |
| 6. Costo promedio anual de energía ⁽³⁾ | | 650 | USD/año |
| 7. Porcentaje estimado solo del costo de energía ⁽⁴⁾ | | 75 | % |
| 8. Estimado de otros costos de O y M | | 160 | USD/año |
| 9. Costo total estimado de O y M | | 810 | USD/año |
| 11. Costo unitario estimado de tratamiento ⁽⁵⁾ | | 0.1 | USD/m ³ |

(1) La energía específica para el sistema de tratamiento de aire a baja presión generalmente es de 22.0 a 26.4 kWh/kg. Este rango es apropiado para fines presupuestarios. Un sistema de baja presión típicamente tiene compresores de aire, post-enfriadores, secadores refrigerantes y secadores desecantes reactivados por calor.

(2) En México, el sector industrial paga hasta 1.85 pesos por kilowatt-hora.

(3) La irrigación del cultivo de tomate se realiza durante 8 meses al año. En el periodo de otoño – invierno (de octubre a febrero) se irriga de 2 – 3 veces por semana mientras que en primavera (de marzo a mayo) de 4 – 7 veces por semana. Para el cálculo de los días al año de operación del sistema se consideró el riego durante 3 veces por semana en el primer periodo y, en el segundo durante 5 veces por semana, dando como resultado un total de 120 días de operación al año.

(4) Se asume que el costo de energía representa el 75% del costo total de O y M del sistema.

(5) Sin considerar inversión.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de la metodología de Langlais et al. (1991), el costo de capital sería la mayor inversión a realizar, el valor asciende a 507,733 USD. Esta suma en un escenario mexicano podría considerarse elevada, pero haciendo un cálculo grosso modo de los rendimientos obtenidos y las ganancias que se pueden alcanzar, se determinó que es posible cubrir la inversión en un periodo de tiempo corto para integrar un sistema de ozonización al tratamiento actual del agua para riego.

La producción de tomates bajo malla sombra en México es normalmente de 120 ton/ha y, según el Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM), el precio promedio vigente de 1 kg de tomate es de 1.12 USD en mercados internacionales. El valor de venta teórico de una agrícola promedio en un ciclo agrícola es de 3,225,600 USD. Sin embargo, si a este valor se le resta el 14% de las pérdidas ocasionadas por nemátodos, en realidad se obtendrían 2,774,016 USD y 451,584 USD se estarán perdiendo (Tabla 42). Si se decide invertir en el tratamiento del agua con ozono, se podrían recuperar alrededor de 450,000 USD, cifra cercana al costo capital del sistema.

Tabla 42. Valor de venta de la producción de tomate

| Precio promedio de tomate | Producción de tomate | Área de una agrícola promedio | Valor de venta máximo | Valor de venta real | Pérdidas |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| 1.12 USD/kg | 120 ton/ha | 24 ha | 3,225,600 USD | 2,774,016 USD | 451,584 USD |

Referente al costo de operación y mantenimiento, éste se basa prácticamente en la energía eléctrica requerida para la producción de ozono. Debido a que no hay productos químicos se eliminan los costos de estos insumos. Gracias a que el sistema de riego no opera de forma continua todo el año, los costos de O y M se mantienen bajos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- Se acepta la hipótesis de estudio, y se concluye que es posible lograr la inactivación del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* presente en el agua para la irrigación agrícola mediante la aplicación de un tratamiento con ozono.
- El ozono tuvo la capacidad de causar daño en la estructura de la pared celular de los huevos de nemátodos afectando su integridad y con ello la viabilidad potencial del nemátodo lo cual está acorde con la acción biocida del ozono.
- El tiempo de contacto fue el factor principal que afectó la tasa de inactivación de *Meloidogyne enterolobii* debido a la alta resistencia de este nemátodo.
- Para lograr la inactivación de 20 huevos de nemátodos por litro, se requirió mantener una concentración de ozono residual en el agua de 0.55 mgO₃/L durante 15 min, lo que corresponde a un valor de CT igual a 8.25 mg-min/L.
- A valores altos de temperatura (~35°C), la tasa de inactivación se redujo 22.5%, mientras que, con un contenido de alcalinidad de 100 mgCaCO₃/L se registró una disminución de 17.5%. Respecto a la materia orgánica, esta variable no representó una diferencia significativa sobre la tasa de inactivación del nemátodo bajo las condiciones evaluadas en este trabajo.
- Como parte del diseño conceptual del sistema de tratamiento de agua para riego del cultivo de tomate, se propone aplicar el ozono posterior a la filtración y previo a la incorporación de fertilizantes, para disminuir la demanda inicial de ozono del agua de riego. Lo anterior se logrará mediante el uso de un reactor de burbuja fina compuesto de tres etapas debido al tiempo de retención hidráulica que puede manejar.
- Con base en un análisis preliminar de costos de capital y de operación y mantenimiento, se concluye que el proceso de desinfección con ozono, es técnica y económicamente viable, para llevar a cabo el control del nemátodo *Meloidogyne enterolobii* en agua de riego.

5.1 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados, se recomienda hacer un escalamiento a planta piloto, realizar las pruebas en el sitio de interés, además de hacer un seguimiento de la calidad del agua y concentración de los nemátodos durante al menos un ciclo agrícola, para realizar ajustes en las dosis de ozono y tamaño de los equipos. Se sugiere que, para la aplicación de ozono a través del riego, la irrigación de los cultivos sea de forma seccionada para que los equipos que conforman el sistema de ozonización sean de tamaños estándares y precios accesibles.

REFERENCIAS

- Adams, B.J., Dillman, A.R. and Finlinson, C. (2009): Molecular taxonomy and phylogeny (pp. 119-138). In: Perry, R.N., Moens, M., Starr, J. L. *Root-knot nematodes*. Wallingford, UK.: CAB International.
- Agrios, G.N., (2005). *Fitopatología*. (2a ed.). México: Limusa.
- Alrousan, D., Dunlop, P., McMurray, T. and Byrne, A. (2009). Photocatalytic inactivation of *E. coli* in surface water using immobilised nanoparticle TiO₂ films. *Water research*, (43), 47 – 54.
- APHA-AWWA-WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (21st ed). Washington, D.C.: American Public Health Association.
- AQUASTAT (2016). *Water uses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Food and agriculture. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm
- Arias, Y., González, I., Rodríguez, M., Rosales, C., Suárez, Z. y Peteira, B. (2009). Aspectos generales de la interacción tomate (*Solanum lycopersicon L.*) – *Meloidogyne incognita*. *Revista de Protección Vegetal*, 24(1), 1-13.
- Arshad, M. and Shakoor, A. (2017). *Irrigation water quality*. Faisalabad, Pakistan: University of Agriculture.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1987). *La calidad del agua y su uso en la agricultura* (pp. 81). Estudios FAO Riego y Drenaje 29, Roma: FAO.
- Bashour, I., Alameddine, A., Wehbe, L., Saad, A. and Nimah, M. (2013). The use of aqua ammonia for the control of soil borne diseases in tomato. *Lebanese Science Journal*, 14, 41–48.
- Bataller, M.O., Fernández, L.A. y Véliz, E. (2010). Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(1), 85-95.
- Behzadi, H.R., Samadi, N., Samadi, A., Safari, M., Shahi, S. and Qaryan, M. (2012). The ozone application for control of the root-knot nematode in tomato greenhouse. *Elixir Agriculture*, 48, 9387-9389.
- Bin, A.K. and Roustan, M. (March 1-3, 2000). *Mass transfer in ozone reactors* (pp. 99-131). International Specialized Symposium IOA 2000 Fundamental and Engineering Concepts for Ozone Reactor Engineering. Toulouse.
- Bing-Mu, H. and Hsuan-Hsien, Y. (2003). Removal of *Giardia* and *Cryptosporidium* in drinking water treatment: a pilot-scale study. *Water Research*, 37(5), 1111-1117.
- Birdsall, C., Jenkins, A.C., and Spandinger, E. (1952). Iodometric determination of ozone. *Analytical Chemistry*, 24(4), 662–664.
- Block, J.C. (1977). *Contribution to the study of disinfection of drinking water by ozone*. Nancy, France: Nancy-Université. PhD these.
- Bocci, V. (2011). *Ozone: A new medical drug* (pp. 17–26). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Brouwer, C., Hoevenaars, J.P.M., van Bosch, B.E., Hacho, N. and Heibloem, M. (1992). Water sources and water availability. In *Irrigation water management: Training manual No. 6 – Scheme irrigation water needs and supply*. Rome, Italy: FAO.
- Campos-Reales-Pineda, A.E., Orta de Velásquez, M.T. and Rojas-Valencia, M.N. (2008). The use of ozone during advanced primary treatment of wastewater for its reuse in agriculture: an approach to enhance coagulation, disinfection and crop productivities. *Water Science Technology*, 57(6), 955-62.

- Can-Chulim, A., Ortega-Escobar, HM., Sánchez-Bernal, EI. y Cruz-Crespo, E. (2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 77-96.
- Castagnone-Sereno, P. (2012). *Meloidogyne enterolobii* (=M.mayaguensis): profile of an emerging, highly pathogenic, root-knot nematode species. *Nematology*, 14, 133 – 138.
- Castillo, P., Nico, AI. y Jiménez Díaz, RM. (2004). Erradicación de nemátodos noduladores en sustratos viverísticos. *Vida rural*, 188, 47-50.
- Cerón Alfaro Oswaldo. (2016). *Procesos de coagulación-floculación-adsorción para la remoción de materia orgánica disuelta responsable del ensuciamiento irreversible de membranas de micro-filtración*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis doctoral en Ingeniería.
- Cho, M., Chung, H. and Yoon, J. (2003). Disinfection of water containing natural organic matter by using ozone-initiated radical reactions. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(4), 2284–2291.
- Cid del Prado-Vera, I., Tovar-Soto, A. y Hernández, J. (2001). Distribución de especies y razas de *Meloidogyne* en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(1), 32- 39.
- Clark, RM., Hurst, CJ. and Regli, S. (1993). Costs and benefits of pathogen control in drinking water. In: *Safety of water disinfection: balancing chemical and microbial risks*. Washington, D.C.: Craun G.F. ed. ILSI Press.
- Coin L., Gomella C., Hannoun C. and Trimoreau JC. (1967). Ozone inactivation of poliomyelitis virus present in water. *La Presse Médicale*, 38aa, 1883-1884.
- CONAGUA (2016). *Estadísticas del agua en México*. (Edición 2016). México: Comisión Nacional del Agua.
- Costa, JL. and Aparicio, V. (2015). Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agricultural Water Management*, 159, 299–306.
- Decraemer, W. and Hunt, D. (2006). Taxonomy and principal genera. Structure and classification (pp. 3-32). In: *Plant Nematology*. Wallingford, UK.: Perry, R., Moens, M. (Eds) CAB International.
- DeMers, LD. and RC. Renner. (1992). *Alternative disinfection technologies for small drinking water systems*. Denver, CO.: AWWARF and AWWA.
- Dimitriou, M.A. (1990). *Design guidance manual for ozone systems*. Norwalk, CN.: International Ozone Association.
- Domènech, X., Jardim, WF. y Litter, MI. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes (pp. 3-26). En *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*. La Plata, Argentina: CYTED.
- Duguet, JP. (1998). Development of a method for the determination of ozone demand of a water. *Ozone Science and Engineering*, 20(6), 513-520.
- Egorova, GV., Voblikova, VA., Sabitova, LV., Tkachenko, IS., Tkachenko, SN. and Lunin, VV. (2015). Ozone solubility in water. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 70(5), 207–210. Allerton Press, Inc.
- Elovitz, MS., von Gunten, U. and Kaiser, HP. (2008). Hydroxyl radical/ozone ratios during ozonation processes. II. The effect of temperature, pH, alkalinity and DOM properties. *Ozone Science and Engineering*, 22, 123-150.
- FAO (1985). *Water quality for agriculture*. Rome: FAO Irrigation and drainage paper, 29.
- FAOSTAT (2016). *Food and agriculture data*. <http://www.fao.org/faostat/en>

- Faulkner, LR. and Bolander, WJ. (1966). Occurrence of large nematode populations in irrigation canals of South Central Washington. *Nematologica*, 12, 591-600.
- Faulkner, LR. and Bolander, WJ. (1970). Agriculturally polluted irrigation water as a source of plant-parasitic nematode infestation. *Journal of Nematology*, 2, 368-374.
- Finch, GR., Black, EK., and Gyürék, LL. (1994). *Ozone and chlorine inactivation of Cryptosporidium*. Water Quality Technology Conference, Part II. San Francisco, CA.
- Finch, GR., Haas, CN., Oppenheimer, JA., Gordon, G. and Trussell, RR. (2001). Design criteria for inactivation of *Cryptosporidium* by ozone in drinking water. *Ozone Science and Engineering*, 23, 259-284.
- FIRA, (2017). *Panorama agroalimentario, tomate rojo*. México: Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.
- Gardoni, D., Vailati, A., and Canziani, R. (2012): Decay of ozone in water: a review. *Ozone Science and Engineering*, 34(4), 233-242.
- Gerrity, D., Gamage, S., Holady, JC., Mawhinney, DB., Quiñones, O., Trenholm, RA. and Snyder, SA. (2011). Pilot-scale evaluation of ozone and biological activated carbon for trace organic contaminant mitigation and disinfection. *Water Research*, 45(5), 2155–2165.
- Godfrey, GH. (1923). The Eelworm disease: a menace to Alfalfa in America. *USDA Circular*, 297, 8.
- Goswami, BK. and Mittal, A. (2004). Management of root-knot nematode infecting tomato by *Trichoderma viride* and *Paecilomyces lilacinus*. *Indian Phytopathology*, 57, 235-236.
- Graham, T., Zhang, P., Woyzbun, E. and Dixon, M. (2011). Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation. *Scientia Horticulturae*, 129, 464–471.
- Guzmán-Piedrahita, O., Castaño-Zapata, J. y Villegas-Estrada, B. (2012). Principales nemátodos fitoparásitos y síntomas ocasionados en cultivos de importancia económica. *Agronomía*, 20(1), 38 – 50.
- Haas C., Heath, M. and Jacanngelo J. (1994). Development and validation of rational design methods of disinfection (pp. 43-51). In: *American Water Works Association Research Foundation*. Denver, CO.
- Han, Y., Floros, JD., Linton, RH., Nielsen, SS. and Nelson, PE. (2002). Response surface modeling for inactivation of *E. coli* O157:H7 on green peppers (*Capsicum annuum*) by ozone gas treatment. *Journal of Food Science*. 67(3), 118-1193.
- Hernández-Juárez, A., Cepeda-Siller, M., Gallegos-Morales, G., Chacón-Hernández, JC., Ordaz-Silva, S. y González-Ruíz, A. (2015). Actividad nematicida de productos orgánicos comerciales, contra *Ditylenchus dipsaci* (Tylenchida: Anguinidae) bajo condiciones de laboratorio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, mayo-junio.
- Hoigné J. and H. Bader. (1976). The role of hydroxyl radical reactions in ozonation process in aqueous solutions. *Water Research*, 10, 377–386.
- Hoigné, J. (1994). Characterization of water quality criteria for ozonation processes. Part I: Minimal set of analytical data. *Ozone Science and Engineering*, 15(2), 113–120.
- Huang, XW., Zhao, NH. and Zhang, KQ. (2004). Extracellular enzymes serving as virulence factors in nematophagous fungi involved in infection of the host. *Research in Microbiology*, 155(10), 811-816.
- Hugo, H. and Malan, A. (2010). Occurrence and control of plant-parasitic nematodes in irrigation water: a review. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 31(2), 169-180.

- Ibáñez-Cervantes, G., Ramírez-Cortina, CR., Márquez-Navarro, A., Alonso-Gutiérrez, MS., León-Ávila, G., León-García, G. and Noguera-Torres, B. (2013). Effect of ozone and peroxone on helminth *Hymenolepis nana* eggs. *Ozone Science and Engineering*, 35(3), 201-207.
- Imai, A., Fukushima, T., Matsushige, K., Kim, YH. and Choi, K. (2002). Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants. *Water Research*, 36(4), 859-870.
- Jones, John T., Haegeman, Annelies., Danchin, Etienne G., Gaur, Hari S., Helder, Johannes, Jones, Michael G., Kikuchi, Taisei., Manzanilla-López, Rosa., Palomares-Rius, Juan E., Wesemael, Wim M. and Perry, Roland N. (2013). Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology – Review. *Molecular plant pathology* 14(9), 946–961.
- Junaid, JM., Dar, NA., Bhat, TA., Bhat, AH. And Bhat, MA. (2013). Commercial biocontrol agents and their mechanism of action in the management of plant pathogens. *International Journal of Modern Plant & Animal Sciences*, 1(2), 39-57.
- Jung, Y., Hong, E., Kwon, M. and Kang, JW. (2017). A kinetic study of ozone decay and bromine formation in saltwater ozonation: Effect of O₃ dose, salinity, pH, and temperature. *Chemical Engineering Journal*, 312, 30–38.
- Karanis, P. (2011). *Giardia and Cryptosporidium*: Occurrence in water supplies (pp. 946-954). In *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier.
- Karuri, HW., Olago, D., Neilson, R., Mararo, E. and Villinger, J. (2017). A survey of root knot nematodes and resistance to *Meloidogyne incognita* in sweet potato varieties from Kenyan fields. *Crop Protection*, 92, 114-121.
- Kevern, RN (1989). *Alkalinity water, classification systems*. Volume Part 1. The Michigan.
- Korich, DG., Mead, JR., Madore, MS., Sinclair, NA., and Sterling, CR. (1990). Effects of ozone, chlorine dioxide, chlorine, and monochloramine on *Cryptosporidium parvum* oocyst viability. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(5), 1423-8.
- Kosma, P., Ambang, Z., Begoude, BAD., Hoopen, GMT., Kuate, J. and Akoa, A., (2011). Assessment of nematicidal properties and phytochemical screening of neem seed formulations using *Radopholus similis*, parasitic nematode of plantain in Cameroon. *Crop Protection*, 30(6), 733–738.
- Lage Filho, FA. (2010). Ozone application in water sources: Effects of operational parameters and water quality variables on ozone residual profiles and decay rates. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 27(4), 545-554.
- Langlais B., Reckhow DA., Brink, D.R. (1991). *Ozone in drinking water treatment: application and engineering*. France: Cooperative Research Report. Lewis Publishers.
- Langlais, B. (1988). La désinfection des effluents rejetés en zone littorale. Procédés de substitution à la chloration. *L'eaux, l'industrie, les nuisances*, 118, 31–32.
- Larocque R. (1999). Ozone applications in Canada: a state of the art review. *Ozone Science and Engineering*, 21, 119-126.
- Lawrence, J. and Cappelli, F. (1977). Ozone in drinking water treatment: a review. *Science of The Total Environment*, 7(2), 99-108.
- Lazarova, V., Janex, ML., Fiksdal, L., Oberg, C., Barcina, I. and Pommeuy, M. (1998) Advanced wastewater disinfection technologies: short and long-term efficiency. *Water Science and Technology*, 38(12), 109–117.

- Liyanage, LR., Finch, GR. and Belosevic, M. (1997). Sequential disinfection of *Cryptosporidium parvum* by ozone and chlorine dioxide. *Ozone Science and Engineering*, 19, 409-411.
- Manivannan, G. (2008). *Disinfection and decontamination: Principles, applications and related issues*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Martin N, Benent-Tousle M. and Laplanche C. (1992). Design and efficiency of ozone contactor of disinfection. *Ozone Science and Engineering*, 14, 391-399.
- Martínez, SB., Pérez-Parra, J. and Suay, R. (2011) Use of ozone in wastewater treatment to produce water suitable for irrigation. *Water Resource Manage*, 25, 2109 – 2124.
- Martínez-Gallardo, J., Díaz-Valdés, T., Allende-Molar, R., García-Estrada, R.S. y Carrillo-Fasio, J.A. (2015). Primer reporte de *Meloidogyne enterolobii* parasitando tomate en Culiacán, Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 2165-2168.
- McDonnell, G. E. (2007). *Antisepsis, disinfection, and sterilization: types, action and resistance*. Washington, D.C.: ASM press.
- Moens, M., Moermans, R. and Hendrickx, G., (1991). Sensitivity of *Meloidogyne incognita* second stage juveniles to ozone treatment. *Meded. Fac. Landbouwwet. Rijksuniv. (Gent)* 56(3b), 1313-1319.
- Moens, M., Pery, RN. and Starr, JL. (2009). *Meloidogyne* species-a diverse group of novel and important plant parasites (pp: 1–17). In: Perry, R.N., Moens, M., Starr, J.L. *Root-knot nematodes*. Wallingford, UK.: CAB International.
- Msayleb, N. (2014). *Soil ozonation as a sustainable alternative to methyl bromide fumigation and synthetic pesticides*. Ames, Iowa: Iowa State University. Philosophy PhD these.
- Mun, S., Cho, SH., Kim, TS., Oh, BT., and Yoon, J. (2009). Inactivation of *Ascaris* eggs in soil by microwave treatment compared to UV and ozone treatment. *Chemosphere*, 77(2), 285–290.
- Muñoz, JF. y Orta, MT. (2012). Efecto del ozono en la remoción de materia orgánica disuelta de un efluente secundario. *Revista EIA*, 18, 171-178.
- Naseby, DC., Pascual, JA. And Lynch, JM. (2000). Effect of biocontrol strains of *Trichoderma* on plant growth, *Pythium ultimum* polulations, soil microbial communities and soil enzyme activities. *Journal of Applied Microbiology*, 88, 161-169.
- Nava-Shimada, R. y Olivares-Watson, GE. (2011). *Desinfección del agua de abastecimiento de Ciudad Universitaria mediante la tecnología de ozono; aspectos de transferencia de masa y dimensionamiento de una cámara de contacto*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
- Nghiem, LD, Manis, A., Soldenhoff, K. and Schäfer, AI. (2004). Wastewater treatment for estrogenic hormone removal using NF/RO membranes. *Journal of Membrane Science*, 242(1-2), 37-45.
- OEPP/EPPO. (2014). *Meloidogyne enterolobii*. *Bulletin OEPP/EPPO*, 44 (2), 159–163.
- Orion, D. (1995). Structure and function of the root-knot (*Meloidogyne* spp.) gelatinous matrix. *Nematologica*, 41, 395-397.
- Orta De Velásquez, MT., Martínez, JL., Monje, I. and Rojas, MN. (2002). Destruction of helminth (*Ascaris suum*) eggs by ozone. *Ozone Science and Engineering*, 26(4), 359-366.

- Orta de Velásquez, MT., Rojas-Valencia, MN. and Campos-Reales-Pineda, AE. (2006). Evaluation of phytotoxic elements, trace elements and nutrients in a standardized crop plant, irrigated with raw wastewater treated by APT and ozone. *Water Science and Technology*, 54(11–12), 165–173.
- Orta de Velásquez, MT., Velázquez-Pedroza K., Yáñez-Noguez I., Monje-Ramírez I. and Campos-Reales-Pineda A. E. (2013). Effects on macronutrient contents in soil-plant irrigated with different quality waters and wastewaters. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(1), 41–49.
- Peregrín, ME. (2013). *Uso de agentes de control y protección biológica frente a nemátodos del género Meloidogyne en cultivos protegidos bajo plástico*. Granada, España: Universidad de Granada. Tesis Doctoral en Ciencias.
- Pérez-Garrido, C., León-Rodríguez, F. y Delgadillo-García, G. (2013). *Tratamiento de aguas Manual de laboratorio*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Phocaidis, A. (2007). Water quality for irrigation. In: *Handbook on pressurized irrigation techniques (7.1–7.33)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Prado, A. (2017). *Diseño de un sistema de desinfección con ozono de agua para riego agrícola*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química.
- Qiu, JJ., Westerdahl, BB. and Pryor, A. (2009). Reduction of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, and ozone mass transfer in soil treated with ozone. *Journal of Nematology*, 41(3), 241–246.
- Rakness, K. L. (2005). *Ozone in drinking water treatment: process design, operation and optimization*. Denver, CO.: American Water Works Association.
- Ramírez-Suárez, A., Rosas-Hernández, L., Alcasio-Rangel, S. and Powers, T. (2014). First report of the root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* parasitizing watermelon from Veracruz, Mexico. *Plant Disease*, 98(3), 428.
- Ramírez-Suarez, A., Alcasio-Rangel, S., Rosas-Hernández, L., López-Buenfil, JA. and Brito, JA. (2016). First report of *Meloidogyne enterolobii* infecting columnar cacti *Stenocereus queretaroensis* in Jalisco, Mexico. *Plant Disease*, 100(7), 1506-1506.
- Rammah, A. and Hirschmann, H. (1988). *Meloidogyne mayaguensis n.sp* (Meloidogynidae), a root-knot nematode from Puerto Rico. *Journal of Nematology*, 20(1), 58-69.
- Retes-Manjarrez, JE. (2017). *Meloidogyne enterolobii*, nemátodo de gran impacto en hortalizas. *Agro excelencia, la revista del profesional del campo*, 12, 2-3.
- Reynolds, RW. and Smith, TM. (1995). A high-resolution global sea-surface temperature climatology, *Journal of Climate*, 8, 1571–1583.
- Richard, Y. (1985). Principles of ozone oxidation and disinfection design. *Ozone Science and Engineering*, 7, 163-171.
- Rincón, A., and Pulgarin, C., (2004). Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on *E. coli* K12 photocatalytic inactivation by TiO₂: implications in solar water disinfection. *Applied Catalysis B: Environmental*, 51(4), 283–302.
- Roberts, PA., Matthews, WC. and Ehlers, JD. (2005). Root-knot nematode resistant cowpea cover crops in tomato production systems. *Agronomy Journal*, 97, 1626 – 1635.
- Rojas, VN., Galván M. y de Victorica J. (1998). Aplicación de colorantes biológicos para determinar la viabilidad de huevos de *Ascaris suum* (helminto). *Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 10(35), 22-27.

- Rojas-Valencia, MN. (2004). *Tratamiento avanzado de desinfección con ozono para eliminar Vibrio cholerae, Salmonella typhi, amebas y huevos de helmintos en aguas residuales tratadas para reúso*. México: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Tesis Doctoral en Ciencias e Ingeniería Ambiental.
- Ruiz, B., Bauzá, J., Benito, J. and Pascual, A. (October 29-31, 2007). Use of ozone for *Legionella* reduction in water systems (pp. 6.4(1)-6.4(7)). IOA Conference and Exhibition. Valencia, Spain.
- Runia, WT. and Amsing, JJ. (April 2–19, 1996). *Disinfestation of nematode-infested recirculation water by ozone and activated hydrogen peroxide* (pp. 381-393). Ninth International Congress on Soilless Culture. St. Helier, Jersey.
- Saccon, P. (2018). Water for agriculture, irrigation management. *Applied Soil Ecology*, 123, 793–796.
- Sánchez, JL., Haynes, JL., Pryor, A. and Caswell-Chen, EP. (2007). Ozonation for control of nematodes in irrigation water. *Journal of Nematology*, 39, 84.
- Schmidt, GD. y Roberts, LS. (1984). *Fundamentos de parasitología*. México: Continental, S. A. de C.V.
- SENASICA. (2015). *Protocolo de diagnóstico integrativo. Meloidogyne enterolobii Yang & Eisenback, 1983 (Nemátodo Agallador)*. México: Dirección General de Sanidad Vegetal, Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria.
- Shin, GA. and Sobsey, MD. (2003). Reduction of Norwalk virus, poliovirus 1, and bacteriophage MS2 by ozone disinfection of water. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7), 3975–3978.
- SIAP. (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp
- Silva, EIL. (2004). Quality of irrigation water in Sri Lanka status and trends. *Asian Journal of Water*, 1(1-2), 5-12.
- Singh, R. and Phulera, S. (2015). Plant parasitic nematodes: The hidden enemies of farmers. In: *Environmental Issues for Socio-ecological Development* (68-81). New Delhi, India: Excel India Publishers.
- SNIIM. (2014). *Observatorio de precios*. <http://observatoriodeprecios.com.mx/index.php/precios-productos/productos-agropecuarios/jitomate/186-el-precio-del-tomate-rojo-jitomate-en-el-mes-de-febrero-y-la-primer-quincena-de-marzo-presento-una-caida-promedio-del-47-en-el-mercado-nacional>
- Solís-López, M. (2009). *Inactivación de huevos de Ascaris suum presentes en agua mediante el proceso de fenton y con luz UV*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría en Ingeniería.
- Solsona, F. y Méndez, JP. (2002). *Desinfección del agua*. PUB/O2.83. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS).
- Soltani, T., Nejad, RF., Ahmadi, AR. and Fayazi, F. (2013). Chemical control of root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) on olive in the greenhouse conditions. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*, 4(6), 183.
- Subbotin, S., and Moens, M. (2006). Molecular taxonomy and phylogeny (pp: 33-51). In Perry, R., Moens, M. *Plant Nematology*. Wallingford, Oxon, UK.: CAB International.
- Talavera, RM. (2003). *Manual de nematología agrícola. Introducción al análisis y al control nematológico para agricultores y técnicos de agrupaciones de defensa vegetal*. Brasil: Instituto de formación agraria y pesquera.
- Taylor, A. y Sasser, J., (1983). *Biología, identificación y control de los nemátodos de nódulo de la raíz (Especies de Meloidogyne)*. Proyecto Internacional de *Meloidogyne*. Raleigh, Estados Unidos: Universidad de Carolina del Norte.

- Thomas V., Loret, JF., Jousset, M. and Greub, G. (2008). Biodiversity of amoebae and amoebae-resisting bacteria in a drinking water treatment plant. *Environmental Microbiology*, 10(10), 2728–2745.
- Tombes, AS., Abernathy, AR., Welch, DM. and Lewis, SA. (1978). Extraction of nematodes from drinking water and the comparative detection efficiency of optical and scanning electron microscopy. *Scanning Electron Microscopy*, 11, 297-302.
- Tranier, MS., Pognant-Gros, J., De la Cruz, R., Aguilar, CN., Maitelle, T. and Roussos, S. (2014). Commercial biological control agents targeted against plant-parasitic root-knot nematodes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 57(6), 831-841.
- U.S. EPA (1989a). Drinking water; national primary drinking water regulations, filtration, disinfection, turbidity, *Giardia lamblia*, viruses, *Legionella*, and heterotrophic bacteria. *Federal Register*, 54, 27485-27541.
- U.S. EPA. (1989b). *Guidance manual for compliance with filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water supplies*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (1999). *Wastewater technology fact sheet. Ozone disinfection*. Office of Water Washington, D.C. EPA 832-F-99-063.
- Van Damme, V., Hoedekie, A. and Viaene, N. (2005). Long-term efficacy of *Pochonia chlamydosporia* for management of *Meloidogyne javanica* in glasshouse crops. *Nematology*, 7, 741-745.
- Velásquez, VR. (2001). Nemátodos agalladores afectando hortalizas y otros cultivos en el Norte Centro de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(1), 107-109.
- Villar-Luna, E., Gómez-Rodríguez, O., Rojas-Martínez, R. and Zavaleta-Mejía, E. (2016). Presence of *Meloidogyne enterolobii* on Jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) in Sinaloa, Mexico. *Helminthologia*, 53(2), 155-160.
- Villénave C., Cadet, P., Planchon, O., Esteve, M. and Lapetite, JM. (2003). Transport of free-living nematodes by runoff water in Sudano-Sahelisan area. *Applied Soil Ecology*, 23, 85–91.
- Voidarou, C., Tzora, A., Skoufos, I., Vassos, D., Galogiannis, G., Alexopoulos, A. and Bezirtzoglou E. (2007). Experimental effects of ozone upon some indicator bacteria for preservation of an ecologically protected watery system. *Water, Air and Soil Pollution*, 181, 161–171
- Waliullah, MIS. (1989). Nematodes in irrigation canals of the Kashmir Valley, India. *Nematologia Mediterranea*, 17, 55-56.
- Wang, X., Wang, L., Liu, Y. and Duan, W. (2007). Ozonation pretreatment for ultrafiltration of the secondary effluent. *Journal of Membrane Science*, 287(2), 187-191.
- Wickramanayake, GB. and Sproul, OJ. (1988). Ozone concentration and temperature effects on disinfection kinetics. *Ozone Science and Engineering*, 10, 123-130.
- Wickramanayake, GB., Rubin, AJ. and Sproul, OJ. (1984). Inactivation of *Giardia lamblia* cysts with ozone. *Applied and Environmental Microbiology*, 48, 671-673.
- Williamson, VM. and Hussey, RS. (1996). Nematode pathogenesis and resistance in plants. *Plant Cell*, 8, 1735-1745.
- Xu, P., Janex, ML., Savoyeb, P. Cockx, A. and Lazarova, V. (2002). Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36, 1043-1055.
- Yang, B. and Eisenback, JD. (1983). *Meloidogyne enterolobii* n. sp. (Meloidogynidae), a root-knot nematode parasitizing pacaes earpod tree in China. *Journal of Nematology* 15, 381-391.

ANEXOS

ANEXO I. SISTEMA DE OZONIZACIÓN

Los experimentos de inactivación de *Meloidogyne enterolobii* con ozono se llevaron a cabo en la unidad de ozonización con la que se cuenta en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería – UNAM representada en la Figura 33.

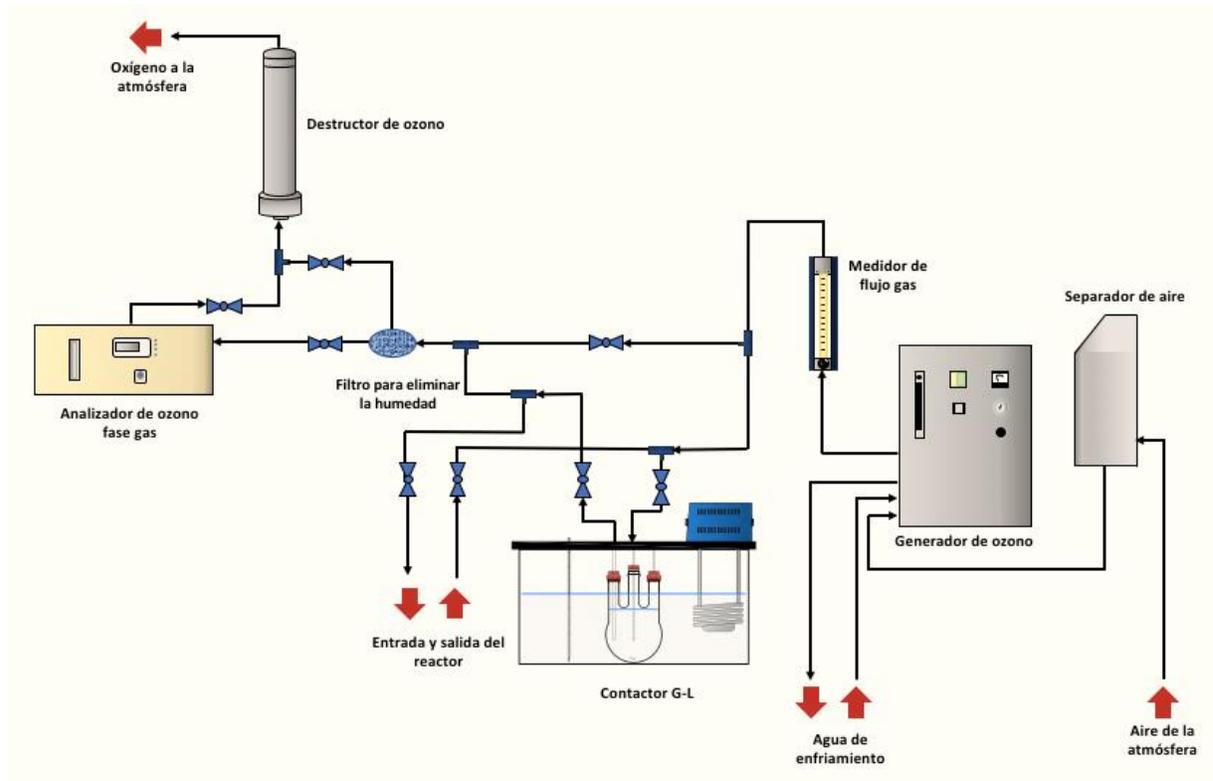


Figura 33. Diagrama de flujo del sistema de ozonización

ANEXO II. HOJAS TÉCNICAS DE GENERADORES DE OZONO



Aplicaciones

- Generador del tipo "Corona Discharge" a partir de aire comprimido seco a -50 °C. de punto de rocío.
- Embotelladoras de mediana capacidad de 950 - 6650 garrafones por hora.
- Capacidad de producción de 19 a 133 g/h de ozono.
- Utilizable en pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales para su reuso.
- Se puede alimentar a partir de compresores de aire no lubricado para aplicaciones grado alimenticio o a partir de compresores lubricados en tratamiento de aguas residuales.

POLARISPOLARISPOLARISPOLARISPOLARISPOLARISPOLARISPOLARIS

Tipo 1 Ozonador

Este equipo consta de un tablero de control de acero al carbón con pintura hornoada montado sobre un bastidor del mismo tipo, donde se alojan el intercambiador de calor, 2 prefiltros de aire, el secador, 1 postfiltro, el tren de potencia, la celda de generación de ozono enfriada por agua y la válvula con actuador neumático en la salida de ozono que protege al equipo contra el posible regreso de agua hacia la celda.







6.0 OZONE GENERATORS

GE Osmonics E-series ozone generators utilize a power supply which will accept a range of electrical voltages at a frequency of 50 or 60 HZ. The HC generators listed below are for the specified voltages at 60 HZ only. HC generators that operate at other voltages and/or 50 HZ can be special ordered from GE Osmonics. Ozone generators need to have a pressurized, clean, dry (-80° F (-62° C) dewpoint) source of oxygen or air depending on the model. Percent output concentrations range from 5-12%.

| Model | IFO P/N | Description | Rating | Power | List (USD) |
|--------------|---------|--|----------------------------|---------------------------|------------|
| EO3-MINI SYS | CFO | Generator, Ozone w/Oxygen Prep System w/out Comp. | 0.1-1 ppd (2-19 g/hr) | 50/60 Hz : 208-240 VAC 1P | \$12,385 |
| EO3-I-02 | 1225117 | Generator, Ozone | 1-3 ppd (19-57 g/hr) | 50/60 Hz : 208-240 VAC 1P | 12,000 |
| EO3-I SYS | 1231235 | Generator, Ozone with Oxygen Prep. System w/out Compressor | 1-3 ppd (19-57 g/hr) | 50/60 Hz : 208-240 VAC 1P | 18,000 |
| HC-02O | 1225523 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 2-20 ppd (37.5-375 g/hr) | 60 Hz : 220-240 VAC 3P | 51,400 |
| HC-03O | 1225524 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 3-30 ppd (56.6-566 g/hr) | 60 Hz : 220-240 VAC 3P | 56,400 |
| HC-04O | 1225525 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 4-40 ppd (75-755 g/hr) | 60 Hz : 220-240 VAC 3P | 63,300 |
| HC-05O | 1225526 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 5-50 ppd (94-944 g/hr) | 60 Hz : 220-240 VAC 3P | 68,400 |
| HC-08O | 1225527 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 8-80 ppd (151-1510 g/hr) | 60 Hz : 460-480 VAC 3P | 101,500 |
| HC-10O | 1225528 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 10-100 ppd (188-1889 g/hr) | 60 Hz : 460-480 VAC 3P | 111,300 |
| HC-12O | 1225529 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 12-120 ppd (226-2267 g/hr) | 60 Hz : 460-480 VAC 3P | 125,900 |
| HC-15O | 1225530 | Generator, Ozone - Oxygen Feed | 15-150 ppd (283-2834 g/hr) | 60 Hz : 460-480 VAC 3P | 140,800 |
| BFP-I | CFO | Back Flow Preventer | 1/4" NPT connections | 50/60 Hz : 220 VAC | 1,985 |

If cooling water is available on-site at a temperature between 50 - 85 °F (10 - 30 °C), then chiller is not required.

| | | | | | |
|------------|-----|-----------------------------|-------|-----------------|-------|
| CHILL-I-60 | CFO | Refrigerated Chiller System | 1 gpm | 60 Hz : 120 VAC | 4,600 |
| CHILL-I-50 | CFO | Refrigerated Chiller System | 1 gpm | 50 Hz : 240 VAC | 4,600 |

CFO- Custom Factory Order, contact GE Osmonics. Part Number not available at time of print.

3M23 OZONE / OXYGEN SYSTEM

The advanced chassis based design of the 3M23 Ozone Generator is the foundation for a powerful ozone production system. It combines the power of patented Floating Plate Technology™ with high concentration ozone reactor cells and high output, amplitude modulated, high frequency power supplies. The fully redundant and self-contained configuration is housed in a stainless steel enclosure. The M Series are the most powerful high output air-cooled ozone generators in the world, with standard designs from 7 lbs./day to more than 50 lbs./day ozone.

Modular redundancy is the key to the M Series revolutionary chassis based design, providing operators with unsurpassed reliability. The 3M23 is engineered to meet the most demanding ozone process requirements with a standard manual and 0-10VDC or 4-20mA proportional ozone control interface. The external control signal interface control, or panel-mounted manual control, provides smooth variable ozone concentration control from 0-100. The intuitive control panel design includes feed gas control, reactor backpressure gauges, power supply feed back reference meter and LED ozone production indicator as well as analog and fault indicator output signals.

Inside the 3M23, the highly efficient and reliable ceramic and titanium reactor cells are powered by an advanced, high frequency, pulse modulated variable control power supply. Responsive and accurate ozone output control is assured by instantaneous amplitude modulation and the proven stability of patented Floating Plate Technology™ reactor cell design—exclusive to Pacific Ozone Technology.

The M Series Ozone Generators from Pacific Ozone Technology are easy to install and easy to operate, making ozone generation and control simple and efficient, to provide years of trouble free operation.



THE 3M23

FEATURES

- Stainless Steel Floor Mount Enclosure
- Air-Cooled Ceramic and Titanium Reactor Cell
- Feed Gas Regulator
- Over Temperature Control
- Stainless Steel Gas Control Manifold
- Redundant modular ozone chassis design

CONTROLS

- Variable Output Control 0-100%
- Power Feed Back Reference Meter 0-10VDC
- Reactor Pressure Gauge 0-15 psi
- Feed Gas Flow Control 0-200scfh
- LED Visual Ozone and Fault Indicators
- On/Off Lighted Circuit Breaker
- Analog Power Supply Output
- 0-10VDC or 4-20mA external control



3M23 OZONE / OXYGEN SYSTEM

Product Description: Ozone Generation System

Part Number R-MSG0332 230V model

Specifications:

Ozone Production
90scfh Oxygen 135 g/hr - 7.1 lbs./day

Ozone Production
90scfh Dry Air 60 g/hr - 3.2 lbs/day

Ozone Concentration 3% - 9% %/wt

Ozone Concentration
Dry Air 1% - 2% %/wt

Maximum
Reactor Pressure 15 psi

Feed Gas Flow Range 0-150 scfh

Variable Control 0-100%

External Control 0-10VDC or 4-20mA

External Output Signal 0-10VDC

Power Consumption 1320 watts

Power Supply Fuse 8 ampere

On/Off Breaker 40 ampere

Air Cooling 720 scfm

Compressed Air
Inlet Fitting 1/2" fnt

Ozone Outlet Fitting 1/2" tube

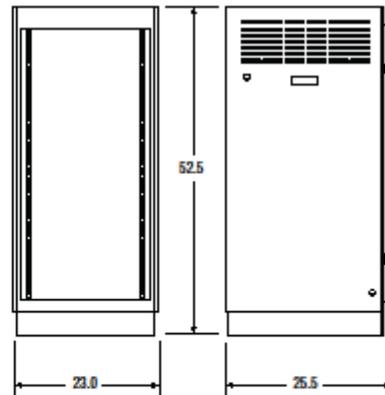
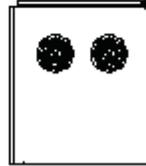
Power Requirement 230V 50/60Hz 1 phase

Height 52.5 inches

Width 23.0 inches

Depth 25.5 inches

Weight 335 lbs.



THE 3M23

OPTIONS
Oxygen Concentrator
Air Dryer
PID Controller
Dissolved Ozone Monitor
Ozone Gas Detector

Optional oxygen concentrator packages and air dryer systems are available to meet the feed gas requirements of the M Series Ozone Generators. See important M Series dry air and oxygen quality requirements.



6160 Egret Court Benicia, CA 94510 / Telephone 707_747_9600 Facsimile 707_747_9209
Email: sales@pacificozone.com Online: www.pacificozone.com

ANEXO III. METODOLOGÍA PARA ESTIMACION DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE OZONIZACIÓN

Procedimiento propuesto por Langlais et al. (1991) en *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering* para la estimación del costo capital y de operación y mantenimiento para un sistema de ozonización.

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CAPITAL

Paso 1: estimar la capacidad instalada del sistema de ozono. La capacidad instalada incluye producción más la reserva. Las necesidades de producción se pueden obtener seleccionando primero la tasa de flujo de agua de diseño, digamos 30 mgd (aproximadamente 4730 m³/h) y la dosificación de ozono aplicada, 3 mg/L. La tasa de producción resultante es de 750 lb/día (aproximadamente 14.2 kgO₃/h). El grado de capacidad de reserva requerido es altamente específico del sitio. Para este ejemplo, se supone que los generadores de ozono funcionan al 75% de su capacidad nominal para cumplir con la tasa de producción del diseño. Esto significa que la capacidad instalada es de 1000 lb/día (aproximadamente 18.9 kg/h) y la capacidad de "reserva" es de 250 lb/día (aproximadamente 4.7 kg/h).

Paso 2: Utilizando la capacidad instalada y la Figura 34, elija el costo unitario del sistema de generación de ozono. Para este ejemplo, la capacidad instalada es 1000 lb/día (18.9 kg/h). Usando la parte más alta de la zona de precios, el costo unitario proyectado es de \$2000/lb/día (726 FrF/g/h).

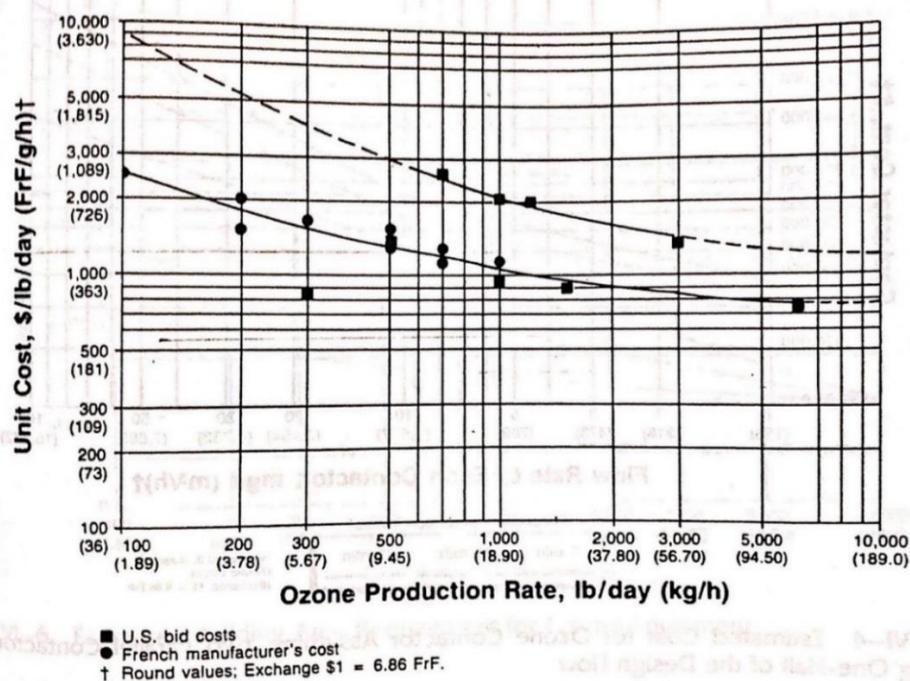


Figura 34. Costo estimado para los equipos del sistema de generación de ozono (Excluyendo el contactor y construcción)

Fuente: Langlais et al., 1991.

Paso 3: Utilizando el costo unitario estimado del paso 2 y el número de capacidad instalada del paso 1, calcule el costo del equipo de generación de ozono. Para este ejemplo, la capacidad instalada propuesta es 1000 lb/día (18.9 kg/h) y el costo unitario anticipado es de \$2000/lb/día (aproximadamente 726 FrF/g/h). El costo resultante del equipo de generación de ozono es \$ 2,000,000 (13,720,000 FrF).

Paso 4: Registre el tiempo teórico de detención hidráulica previsto en el contactor de ozono. El tiempo teórico de detención hidráulica es una función del propósito de la ozonización. Para este ejemplo, se supone que el tiempo teórico de detención hidráulica es de 10 minutos.

Paso 5: Utilizando la tasa de flujo de agua de diseño del paso 1 y el tiempo teórico de retención hidráulica previsto del paso 4, interpolar, si es necesario, entre las curvas de precios que se muestran en la Figura 35 e identificar el costo del sistema de contacto de ozonización. Para este ejemplo, el caudal de agua de diseño es de 30 mgd (4730 m³/h) y el tiempo teórico de detención hidráulica previsto es de 10 min. La curva de costos se basa en dos cuencas que requieren cada una un flujo de 10 mgd (2365 m³/h). De la Figura 34, el costo estimado del contactor es de \$ 1,000,000 (aproximadamente 6,860,000 FrF).

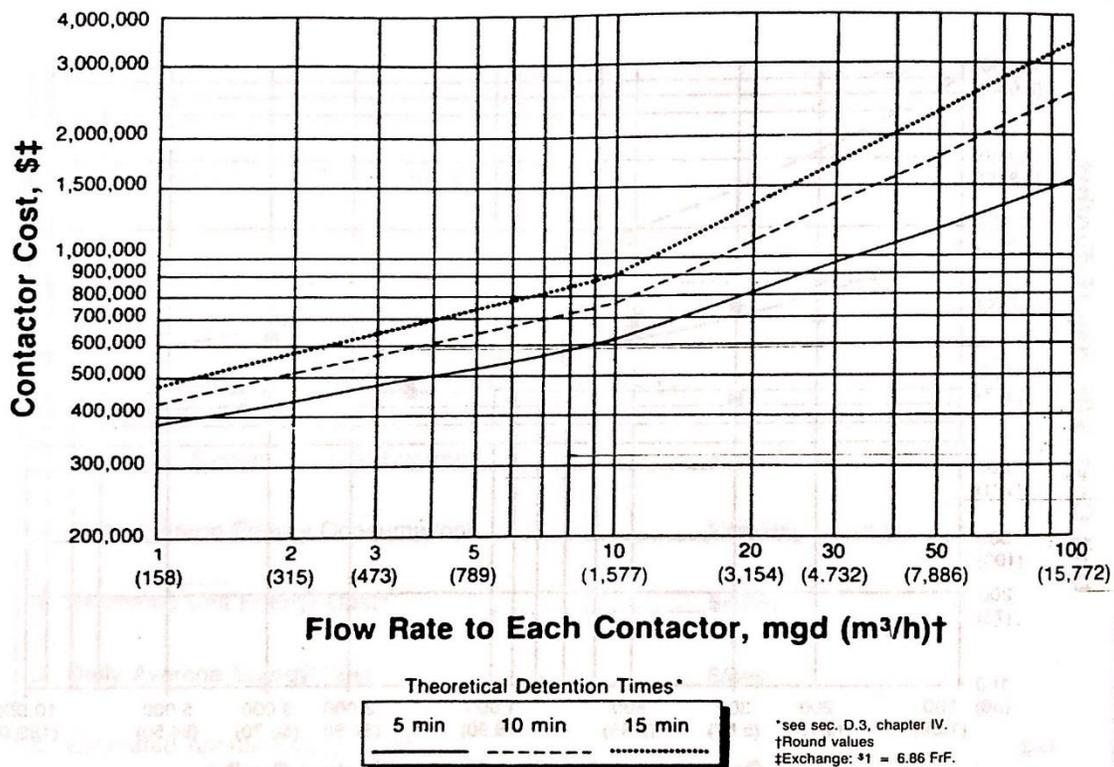


Figura 35. Costo estimado para el contactor de ozono
Fuente: Langlais et al., 1991.

Paso 6: Utilizando el número de capacidad de ozono instalado del paso 1 y la Figura 36, seleccione el área de la unidad para alojar el equipo de ozono. Para este ejemplo, la capacidad instalada es 1000 lb/día (18.9 kg/h). Usando la Figura 33, el área de construcción propuesta es de 4.5 ft²/lb/día (0.022 m²/g/h).

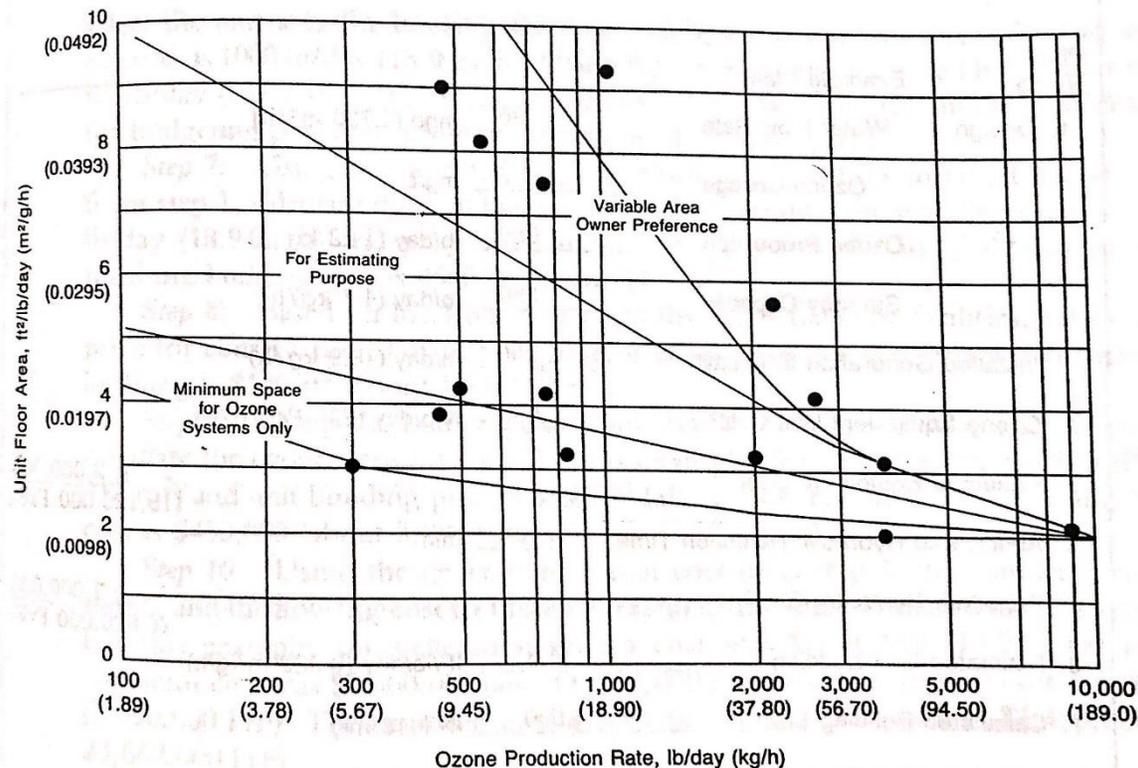


Figura 36. Área de construcción estimada para el equipo de ozono
Fuente: Langlais et al., 1991.

Paso 7: Usando el tamaño del edificio de la unidad desde el paso 6 y la capacidad de ozono instalada desde el paso 1, calcule el tamaño del edificio. Para este ejemplo, la capacidad instalada de ozono es 1000 lb/día (18.9 kg/h) y el área de construcción propuesta es 4.5 ft²/lb/día (0.022 m²/g/h). El área de construcción resultante es 4500 ft² (aproximadamente 418 m²).

Paso 8: según los costos de construcción locales para las instalaciones de tipo industrial, seleccione el precio unitario para la construcción. Para este ejemplo, se supone que el precio para la construcción es de \$100/ft² (alrededor de 7400 FrF/m²).

Paso 9: Usando el tamaño del edificio del paso 7 y el precio de construcción de la unidad del paso 8, calcule el costo para alojar el sistema de ozonización. Para este ejemplo, el área de construcción es de 4500 ft² (aproximadamente 418 m²) y el precio de construcción de la unidad es de \$100/ft² (alrededor de 7400 FrF/m²). El costo de construcción resultante es de \$450,000 (aproximadamente 3,090,000 FrF).

Paso 10: Utilizando el costo del sistema de generación del paso 3, el costo del contactor del paso 5 y el costo de construcción del paso 9, calcule el costo total estimado del sistema de ozono. Para este ejemplo, el costo del sistema de generación fue de \$ 2,000,000 (13,720,000 FrF), el costo del contactor fue de \$ 1,000,000 (aproximadamente 6,860,000 FrF) y el costo de construcción fue de \$ 450,00 (3,090,000 FrF). El costo total estimado del sistema de ozono es de \$ 3,450,000 (aproximadamente 23,667,000 FrF).

La Figura 37 resume los resultados obtenidos para este ejemplo.

| Plant Name: <u>Example Plant</u> | |
|---|--|
| 1. Design | Water Flow Rate <u>30</u> mgd (4,730 m ³ /h) |
| | Ozone Dosage <u>3</u> mg/L |
| | Ozone Production <u>750</u> lb/day (14.2 kg/h) |
| | Standby Capacity <u>250</u> lb/day (4.7 kg/h) |
| | Installed Generation Capacity ¹ <u>1,000</u> lb/day (18.9 kg/h) |
| 2. Ozone Equipment Unit Cost ² | <u>2,000</u> \$/lb/day (726 FrF/g/h) |
| 3. Projected Equipment Cost | \$ 2,000,000 (13,720,000 FrF) |
| 4. Anticipated Hydraulic Detention Time: <u>10</u> min | |
| 5. Projected Contactor Cost ³ | \$ 1,000,000 (6,860,000 FrF) |
| 6. Estimated Unit Building <u>4.5</u> ft ² /lb/day (0.022 m ² /g/h) | |
| 7. Calculated Building Size <u>4,500</u> ft ² (418 m ²) | |
| 8. Estimated Unit Building Cost <u>100</u> \$/ft ² (7400 FrF/m ²) | |
| 9. Projected Housing Cost ⁴ | \$ 450,000 (3,090,000 FrF) |
| 10. TOTAL ESTIMATED OZONE SYSTEM COSTS | \$ 3,450,000 (23,667,000 FrF) |

NOTE: The prices above include installation, but do not include other costs such as "site work" (highly variable depending on site conditions and whether or not the ozone facilities are constructed as a stand-alone project or are part of other plant works); design and construction management services; or owner's administration, legal and management expenses.

¹Includes operating plus standby units.

²Includes ozone generators, air treatment equipment, offgas treatment units, electrical gear, and miscellaneous.

³Includes two bubble diffuser ozone contactors in parallel. Each contactor has six compartments in series (see Figure VI-5). BE SURE TO USE THE FLOW RATE TO EACH CONTACTOR WHEN USING FIGURE VI-4.

⁴Includes space for the ozone generators, air treatment equipment, offgas treatment units, electrical gear, and miscellaneous.

Figura 37. Estimación del costo de capital del sistema de ozonización
Fuente: Langlais et al., 1991.

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Paso 1: Estime la tasa de producción de ozono anual promedio para el sistema de ozono instalado. Esto se puede obtener seleccionando primero la tasa de flujo de agua anual promedio, digamos 20 mgd (3150 m³/h), y la dosis de ozono aplicada, 2.5 mg/L. Se observa que estas cifras son menores que la tasa de diseño y representan las necesidades fluctuantes durante las diferentes estaciones. La tasa de producción promedio anual resultante es 417 lb/día (aproximadamente 7.9 kgO₃/h).

Paso 2: Elija el número de energía específico del sistema de generación de ozono. La energía específica del sistema para el sistema de tratamiento de aire a baja presión generalmente es de 10 a 12 kWh/lb (22.0 a 26.4 Wh/g). Este rango es apropiado para fines presupuestarios. Un sistema de baja presión típicamente tiene compresores de aire, post-enfriadores, secadores refrigerantes y secadores desecantes reactivados por calor. Para este ejemplo, la energía específica seleccionada es 11.5 kWh/lb (25.3 Wh/g). Tenga en cuenta que los costos de los equipos de generación de ozono se basan en los números de oferta de EE. UU. de la Figura 31 (curva de costo superior) que asumen un sistema de tratamiento de aire a baja presión.

Paso 3: Utilizando la tasa de producción promedio anual del paso 1 y la energía específica del sistema del paso 2, calcule el consumo de energía promedio diario. Para este ejemplo, la tasa de producción de ozono promedio anual es de 417 lb (aproximadamente 7.9 kgO₃/h) y la energía específica del sistema es de 11.5 kWh/lb (25.3 Wh/g). El consumo diario promedio de energía resultante es de 4795 kWh/día.

Paso 4: Con base en la información de precios eléctricos locales, calcule el costo unitario de la energía eléctrica, expresado en términos de \$/kWh o FrF/kWh. Todos los cargos de la compañía eléctrica, tales como los costos de la demanda de energía, los ajustes de los costos de combustible y los cargos por consumo de energía deben incorporarse en esta estimación. Para este ejemplo, se supone que el precio total de la energía es de \$0.06/kWh (aproximadamente 41 céntimos/kWh).

Paso 5: Utilizando el número de consumo de energía del paso 3 y el costo unitario de energía del paso 4, calcule el costo de energía anual. Para este ejemplo, el consumo diario estimado de energía es de 4795 kWh/día y el precio unitario de energía es de \$0.06/kWh (41 céntimos/kWh). El costo de energía diario resultante es de \$287.79/día (alrededor de 1970 FrF/día).

Paso 6: Utilizando el costo diario, calcule el costo anual de energía. Para este ejemplo, el costo de energía diario es de \$287.70/día. Suponiendo 365 días hábiles, el costo anual de energía resultante es de \$105,010 por año (alrededor de 720,400 FrF/año).

Paso 7: Estime el porcentaje del costo anual total de O y M que se atribuye al costo de la energía. En las instalaciones operativas, el costo de la energía ha sido del 65 al 80% del costo total de operación y mantenimiento del sistema. Otros costos, como el tiempo del operador para las lecturas diarias del equipo, los costos de reemplazo de piezas de

repuesto, las actividades de mantenimiento preventivo y de emergencia, etc. van del 20 al 35% del costo total. El porcentaje de costo para el costo de la energía puede ser menor cuando el precio de la energía es relativamente bajo y el costo de la mano de obra es relativamente alto. Muy a menudo, el costo de energía representa el 75% del costo total de operación y mantenimiento del sistema. Este es el porcentaje utilizado para este ejemplo.

Paso 8: Utilizando el factor de costo de energía del paso 7 y el costo de la energía del paso 6, determine el costo para "otras" actividades de O y M de ozono. El costo de la energía es de \$105,010 por año (aproximadamente 720,400 FrF / año) y el costo de energía es el 75% del costo total de operación y mantenimiento del sistema (Nota: el factor de 75% es una regla general; para obtener más información sobre cómo determinar los costos, consulte Rezcko et al., 1900.) El costo resultante de O y M, excluyendo energía, es de \$ 35,000 por año (alrededor de 240,000 FrF / año).

Paso 9: Utilizando el costo de energía anual estimado del paso 6 y el costo estimado de "otros" O y M del paso 8, calcule el costo total de operación y mantenimiento del sistema. El costo de la energía es de \$105,010 por año (alrededor de 240,000 FrF). El costo total anual de operación y mantenimiento del sistema es de \$140,010 (aproximadamente 960,400 FrF).

La Figura 38 resume los costos de operación y mantenimiento para este ejemplo.

| | | |
|---|----------------------|--|
| Plant Name: | <u>Example Plant</u> | |
| 1. Operating Ozone Production Rate | | |
| Annual Average Flow | <u>20</u> | mgd (3,150 m ³ /h) |
| Annual Average Dose | <u>2.5</u> | mg/L |
| Annual Average Production | <u>417</u> | lb/day (7.9 kg/h) |
| 2. Estimated System Specific Energy¹ | | |
| | <u>11.5</u> | kWh/lb (25.3 Wh/g) |
| 3. Daily Average Energy Consumption² | | |
| | <u>4,795</u> | kWh/day |
| 4. Estimated Unit Energy Cost³ | | |
| | <u>0.06</u> | \$/kWh (41 centimes/kWh) |
| 5. Daily Average Energy Cost | | |
| | <u>287.70</u> | \$/day (1,970 FrF/day) |
| 6. Estimated Annual Energy Cost | | |
| | | <u>105,010</u> \$/yr (720,400 FrF/yr) |
| 7. Est. Cost Factor for Energy Alone⁴ | | |
| | <u>75</u> | % |
| 8. Estimated "Other" O&M Cost | | |
| | | <u>35,000</u> \$/yr (240,000 FrF/yr) |
| 9. TOTAL ESTIMATED O&M COST | | |
| | | <u>140,010</u> \$/yr (960,400 FrF/yr) |

¹Typically ranges from 10 to 12 kWh/lb for low-pressure air treatment ozone generation systems.

²Formula: Cost = O₃ production (lb/day) × specific energy consumption (kWh/lb).

³For purposes of this estimate, all electrical company charges, such as power demand, fuel cost adjustment, and energy consumption charges, should be incorporated into a single number relative to the kWh of energy consumed.

⁴Energy costs typically range from 65% to 80% of the total system O&M cost and generally are 75%. The "other" costs include activities or items such as operator time for daily equipment readings, spare parts replacement cost, preventive and emergency maintenance activities, etc.

Figura 38. Estimación del costo de operación de un sistema de ozono
(Alimentado con aire)

Fuente: Langlais et al., 1991.