



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



TESIS

CON EL TEMA:

**“Evaluación integral del riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate
bajo sistemas protegidos”**

QUE PRESENTA:

INGRID MARIAN MEDRANO ROJO

ASESOR

MC. FAUSTINO RAMIREZ RAMIREZ

REVISORES

MC. JORGE ARMANDO PERALTA NAVA

ING. DIANA HERNANDEZ MONREAL

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN AGRONOMÍA

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. FEBRERO, 2026.



Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 03/Febrero/2026

No. DE OFICIO: D.SA/DEP/235/2026

ASUNTO: Autorización de impresión definitiva y digitalización.

C. INGRID MARIAN MEDRANO ROJO
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN AGRONOMÍA
P R E S E N T E

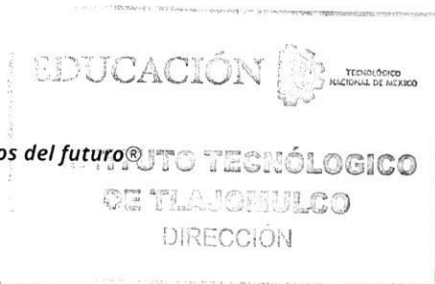
Dado que el Comité dictaminó como **APROBADA** su TITULACIÓN INTEGRAL: OPCIÓN I (TESIS), con el tema "Evaluación integral del riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate bajo sistemas protegidos" y determinó que al cumplimiento con los requisitos establecidos, se le notifica que tiene la autorización para su impresión definitiva y digitalización.

Sin otro particular quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro®



C. MARÍA ISABEL BECERRA RODRÍGUEZ
DIRECTORA DEL PLANTEL

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio

C.c.p.- Minutario. -

MIBR/IGL/ATR/mjhc*



2026
año de
Margarita
Maza





Instituto Tecnológico de Tlajomulco

Dirección

Subdirección Académica

Departamento de Ciencias Agropecuarias

Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, 30/Enero/2026

No. DE OFICIO: D.SA/DCA/051/2026

ASUNTO: Liberación de proyecto para
la titulación integral.

ME. ANDREA TORRES RICO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

NOMBRE DEL ESTUDIANTE Y/O EGRESADO:	INGRID MARIAN MEDRANO ROJO
NO. DE CONTROL:	21940190
PRODUCTO:	OPCIÓN I (TESIS)
CARRERA:	INGENIERÍA EN AGRONOMÍA
NOMBRE DEL PROYECTO:	"Evaluación integral del riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate bajo sistemas protegidos"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

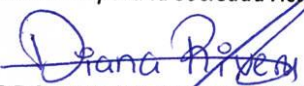
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Educando para la sociedad Actual y los Retos del futuro®



S.E.P.
TECNM
14DIT0003B
TLAJOMULCO
CIENCIAS
AGROPECUARIAS


DRA. DIANA MARIA RIVERA RODRIGUEZ
RESPONSABLE DEL DEPARTAMENTO
DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

 MC. FAUSTINO RAMIREZ RAMIREZ Nombre y firma del asesor	 MC. JORGE ARMANDO PERALTA NAVA Nombre y firma del revisor	 ING. DIANA HERNANDEZ MONREAL Nombre y firma del revisor
---	--	--

C.c.p.- Coordinación Titulación. - Edificio

C.c.p.- Minutario. -

DMRR/mjhc*



2026
año de
Margarita
Maza



Índice

.....	1
.....	2
.....	3
.....	4
Agradecimientos.....	5
Índice.....	8
Índice de tablas	14
Índice de figuras	15
Índice de gráficos	16
Índice de Anexo.....	17
Resumen.....	18
Abstrac	20
1. Introducción.....	21
1.2. Justificación	23
1.1. Planteamiento del problema	27
2. Antecedentes	29
2.1. Cultivo de jitomate	29
2.1.1. Antecedentes del cultivo de jitomate.....	29
2.1.1.1. Importancia económica, social y agroalimentaria del jitomate en México.....	29
2.1.1.2. Características morfológicas y fisiológicas	30
2.1.1.3. Tallo y hojas	31
2.1.1.4. Floración	31

2.1.1.5 Fruto.....	32
2.2. Manejo Fitosanitario por Etapas Fenológicas en el Cultivo de Jitomate	32
2.2.1.Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la Pre-siembra.....	33
2.2.2.Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la etapa vegetativa ..	35
2.2.3.Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la etapa de maduración y cosecha	35
2.3. Manejo fitosanitario en invernadero	37
2.3.1.Exclusión y Prevención	37
2.3.2.Monitoreo y Detección Temprana	37
2.3.3.Control Ambiental.....	38
2.3.4. Control Biológico	38
2.3.5.Control Químico de Precisión.....	38
2.4. Manejo Fitosanitario en Macro Túneles	39
2.4.1. Ventilación y Manejo del Microclima	39
2.4.2. Monitoreo Específico en Espacio Confinado	39
2.4.3.Control Biológico Adaptado	39
2.4.4.Manejo del Cultivo y Saneamiento	40
2.4.5.Control Químico Selectivo y de Bajo Impacto	40
2.5.Sistemas de Cultivo Macrotúneles vs. Invernaderos	40
2.5.1.Inversión, Costos Operativos y Rentabilidad.....	42
2.5.2..Manejo Fitosanitario y Sostenibilidad	42
2.6. Impacto del Manejo Integrado en la Producción Sostenible del Jitomate ...	42
2.6.Riesgo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate	43
2.6.1. Riesgo fitosanitario	43
2.7.Riesgo Fitosanitario en Invernadero y Macrotúneles	44

2.7.1. Riesgo Fitosanitario en Invernadero.....	44
2.7.2. Factores que Aumentan el Riesgo	45
2.7.3. Factores que Disminuyen el Riesgo	45
2.7.4. Riesgo Fitosanitario en Macrotúneles	46
2.7.5. Factores que Aumentan el Riesgo	46
2.7.6. Factores que Disminuyen el Riesgo	46
2.8. Principales plagas y enfermedades del jitomate	46
2.8.1. Plagas del Tomate	46
2.8.2. Enfermedades del Tomate	48
2.9. Factores que Influyen en la Incidencia de Plagas y Enfermedades en Jitomate	50
2.9.1. Clima	50
2.9.2. Manejo de Riego y Nutrición	50
2.9.3. Densidad de Cultivo	51
2.9.4. Rotación de Cultivos	51
2.10. Dinámica poblacional.....	51
2.10.1 Dinámica poblacional y su importancia para la predicción de brotes ..	51
2.10.2. Importancia para la predicción de brotes	51
2.10.3. Optimización del Control Biolológico y el MIP	52
2.10.4. Reducción de Pérdidas y Costos mediante la Cuantificación	52
2.10.5. Factores que Gobiernan la Dinámica Poblacional.....	52
2.10.5. Aplicación Práctica en Cultivos de Alto Valor	53
2.10.6. Riesgo fitosanitario	53
2.10.7. Mecanismos de Reducción del Rendimiento	53
2.10.8. Impacto Económico y Calidad Comercial	54

2.10.9.Efectos Sinérgicos y Umbrales Críticos	54
2.11. Manejo integrado de plagas y enfermedades (MIP) en jitomate	55
2.11.1. Manejo integrado de plagas y enfermedades	55
2.11.2.Estrategias de Monitoreo y Diagnóstico	55
2.12. Estrategias de prevención	55
2.12.1.Selección Genética y Uso de Variedades Resistentes.....	55
2.12.2.Saneo fitosanitario.....	56
2.12.3.Manejo del Ambiente Protegido	56
2.12.4.Implementación de Barreras Físicas y Sistemas de Exclusión	57
2.12.5.Preparación y Manejo del Suelo o Sustrato	57
2.12.6.Planificación y Diseño del Sistema Productivo.....	57
2.12.7.Herramientas de modelación y monitoreo Invernadero y Macro túnel	58
2.12.8.Sistemas de Monitoreo para Invernadero y Macro túnel	58
2.13. Perspectivas de sostenibilidad.....	59
2.13.1Transición hacia Sistemas Agroecológicos	59
2.13.2.Manejo Sostenible del Suelo y el Agua	59
2.13.3.Control Biológico de Plagas y Enfermedades	60
2.13.4.Economía Circular y Cero Residuos	60
2.13.5.Adaptación y Mitigación del Cambio Climático.....	60
2.13.6. Certificaciones y Mercados Diferenciados	61
2.14. Impacto de las Estrategias Fitosanitarias en el Rendimiento.....	61
2.14.1.Análisis de Costos de Implementación.....	61
2.14.2. Beneficios y Rentabilidad	62
2.14.3.Análisis Comparativo entre Sistemas.....	62
2.14.4. Externalidades Positivas y Sostenibilidad	63

2.14.5. Factores Críticos de Éxito	63
3.Objetivos.....	64
3.1 .GENERAL	64
3.1.1. ESPECIFICOS	64
4. Hipotesis.....	65
5. Materiales y métodos	66
5.1. Localización y condiciones experimentales	66
5.2. Objetivo y enfoque de la investigación.....	66
5.3. Desinfección	66
5.4.Establecimiento del cultivo	66
5.5. Sistema de monitoreo fitosanitario.....	67
5.5.1. Plataforma de registro y documentación	67
5.5.2. Instrumental de campo especializado	67
5.6. Metodología de muestreo estructurado	67
5.6.1. Sistema de trampeo y variables monitoreadas	68
5.7. Manejo fitosanitario integrado.....	68
5.8. Evaluación de rendimiento.....	68
5.9.Análisis estadístico	69
5.10. Modelación de la dinámica poblacional y análisis económico	69
6. Resultados	70
6.1 Análisis de varianza de la fenología de la planta	70
6.1.1. Análisis de Varianza (ANOVA) de Efectos Principales Significativos para la Variable CREC_TOT: Ausencia de Interacción entre Semana y Tratamiento.	70
6.2.Monitoreo enfermedades	82
6.2.1. Series individuales por enfermedad	84

6.3 Monitoreo plagas	91
6.4 Bitácora de aplicaciones	99
6.5 Analisis de cosecha	111
7. Conclusiones.....	116
Conclusión	116
1.1. Eficacia del sistema de monitoreo fitosanitario predictivo.....	116
1.2. Significancia estadística de los factores fenológicos y de sistema	117
1.3. Dinámica temporal diferenciada de plagas y enfermedades	117
1.4. Eficiencia del manejo fitosanitario integrado.....	117
1.5. Rendimiento de cosecha	117
1.6. Generación de umbrales dinámicos y herramientas predictivas.....	118
8. Referencias Bibliográficas	119
9. Anexos	124

Índice de tablas

Tabla 1 Anova para CREC- TOP	70
Tabla 2 Análisis de Varianza (ANOVA) para la Variable CREC_TOTAnálisis de Varianza (ANOVA) para la Variable CREC_TOT	72
Tabla 3 ANOVA para CREC_TOT	76
Tabla 4 ANOVA PARA CREC_SEM	77
Tabla 5 Prueba de Comparaciones Múltiples de Tukey para CREC_SEM	79
Tabla 6 ANOVA PARA CREC-SEMANAL	82
Tabla 7 Parámetros del modelo lineal	86
Tabla 8 Parámetros del modelo polinomial por enfermedad	87
Tabla 9 Tasa de cambio semanal por enfermedad	89
Tabla 10 Parámetros del modelo lineal por plaga	94
Tabla 11 Parámetros del modelo polinomial por plaga	95
Tabla 12 Tasa de cambio semanal por plaga	96
Tabla 13 Resumen final de plagas	98
Tabla 14 Parámetros del modelo lineal por programa	105
Tabla 15 Parámetros del modelo polinomial por programa	106
Tabla 16 Tasa de cambio semanal	107
Tabla 17 ANOVA-Tatamiento INV vs MACRO	111
Tabla 18 ANOVA – Tratamientos INV vs MACRO Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para KG	113
Tabla 19 Medidas y desviaciones por tratamiento	114

Índice de figuras

Figura 1 Morfología del cultivo de jitomate.....	30
Figura 2 Flor del jitomate.....	31
Figura 3 Etapas fenológicas.....	32
Figura 4 Macrotunel	41
Figura 5 Invernadero	41

Índice de gráficos

Gráfico 1 Evolución Temporal del Crecimiento Total (CREC_TOT).....	71
Gráfico 2 Distribución de CREC_TOT	75
Gráfico 3 Interacción Semana*Tratamiento para CREC_SEM.....	78
Gráfico 4 ANOVA para CREE-SEM	81
Gráfico 5 Dinamica temporal de enfermedades	82
Gráfico 6 de Tendencias Suavizadas.....	83
Gráfico 7 Comportamiento por Tipo de Enfermedad	84
Gráfico 8 Severidad por Unidad Experimental	85
Gráfico 9 Tendencias suavizadas	91
Gráfico 10 Gusano_Cogollero Araña_Roja	92
Gráfico 11Gusano_Soldado – Minador	92
Gráfico 12 MOSCA_BLANCA	94
Gráfico 13 Dinámica temporal de programas	99
Gráfico 14 Tendencias suavizadas (LOESS) por programa	101
Gráfico 15 Series individuales del programa.....	102
Gráfico 16 ANOVA-Tratamientos INV vs MACRO GRAFICO	112
Gráfico 17 Distribución de KG	113

Índice de Anexo

Anexo 1 Pre-siembra.....	124
Anexo 2 Limpieza del área.....	125
Anexo 3 Establecimiento del cultivo	125
Anexo 4 Monitoreo	126
Anexo 5 Aplicación foliar.....	126
Anexo 6 Toma de datos	127
Anexo 7 Toma de datos 2	128
Anexo 8 Monitoreo de plagas.....	129
Anexo 9 Cosecha	130

Evaluación Integral Del Riesgo Fitosanitario En El Cultivo De Jitomate Bajo Sistemas Protegidos

Faustino Ramírez Ramírez¹, Ingrid Marian Medrano Rojo

¹Empresa RAFNAEL,... Programa de exportaciones ,Cuerpo Académico: Ambientes Sustentables
Dirección: Kilómetro 10 Carretera San Miguel Cuyutlán-San Juan Evangelista , 45116 Tlajomulco de Zúñiga,
Jalisco, México.

mail: rancho2024admon@gmail.com

Resumen

El presente estudio evaluó integralmente el riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo sistemas protegidos (invernadero y macrotúnel), desde la etapa de pre-siembra hasta la cosecha. Se implementó un sistema estandarizado de monitoreo fitosanitario que integró trampeo cromático, muestreo estratificado y registro fenológico mediante la escala BBCH modificada. La investigación incorporó la modelación de la dinámica poblacional de plagas y enfermedades, la cuantificación de su impacto en el rendimiento y calidad del fruto, y un análisis costo-beneficio de las estrategias de control aplicadas.

Los resultados mostraron diferencias significativas en la dinámica poblacional de plagas como *Bemisia tabaci*, *Tetranychus urticae* y *Liriomyza* spp., con patrones de crecimiento diferenciados entre sistemas. La aplicación de modelos lineales y polinomiales permitió identificar umbrales críticos de intervención y optimizar el timing de las aplicaciones. El análisis de varianza (ANOVA) reveló efectos significativos de la semana fenológica ($p < 0.0001$) y del tratamiento ($p < 0.0001$) sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo.

El sistema de invernadero registró un rendimiento promedio significativamente superior (16,286.65 kg) en comparación con el macrotúnel (10,019.12 kg), atribuible a un mejor control microclimático y una menor incidencia de virosis. El análisis económico demostró una relación costo-beneficio favorable para las estrategias de manejo integrado, con una reducción del 30-40% en aplicaciones de insumos sintéticos y una mejora en la calidad comercial del fruto.

Se concluye que la implementación de sistemas de monitoreo estandarizados, combinados con modelos predictivos de dinámica poblacional, permite una gestión fitosanitaria más eficiente y sostenible en sistemas protegidos de jitomate

Integral assessment of the phytosanitary risk in tomato cultivation under protected systems

Faustino Ramírez Ramírez¹, Ingrid Marian Medrano Rojo

¹RAFNAEL Company, Export Program, Academic Group: Sustainable Environments Address: Kilometer 10, San Miguel Cuyutlán-San Juan Evangelista Highway, 45116 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, Mexico.

Email: rancho2024admon@gmail.com

Abstrac

The results showed significant differences in the population dynamics of pests such as *Bemisia tabaci*, *Tetranychus urticae*, and *Liriomyza* spp., with distinct growth patterns between the systems. The application of linear and polynomial models helped identify critical intervention thresholds and optimize the timing of control applications. Analysis of variance (ANOVA) revealed significant effects of the phenological week ($p < 0.0001$) and the treatment ($p < 0.0001$) on crop growth and yield.

The greenhouse system recorded a significantly higher average yield (16,286.65 kg) compared to the macro-tunnel (10,019.12 kg), attributable to better microclimate control and a lower incidence of viral diseases. The economic analysis demonstrated a favorable cost-benefit ratio for the integrated management strategies, with a 30-40% reduction in synthetic input applications and an improvement in the commercial quality of the fruit.

It is concluded that the implementation of standardized monitoring systems, combined with predictive models of population dynamics, enables more efficient and sustainable phytosanitary management in protected tomato systems

1. Introducción

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) constituye uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia a nivel global, tanto por su valor nutricional como por su importancia económica. México se ha consolidado como el principal exportador mundial de esta solanácea, con un volumen que supera las 1.45 millones de toneladas anuales y genera ingresos por más de 2,491 millones de dólares. Esta posición privilegiada en el mercado internacional, particularmente en el segmento invernal de Estados Unidos, ha impulsado la modernización del sector mediante la adopción de sistemas de producción protegida, principalmente invernaderos y macrotúneles. Sin embargo, esta intensificación productiva ha generado nuevos desafíos fitosanitarios que requieren atención inmediata.

Los sistemas protegidos, si bien ofrecen ventajas significativas en el control ambiental y la protección contra factores abióticos, crean condiciones microclimáticas particulares que favorecen el desarrollo de complejos de plagas y enfermedades específicos. La alta densidad de plantación, la humedad relativa elevada y la temperatura estable característicos de estos sistemas constituyen un ambiente propicio para la proliferación de patógenos como *Phytophthora infestans* (causante del tizón tardío), *Oidium neolycopersici* (ocasionante de la cenicilla) y *Botrytis cinerea* (responsable de la pudrición gris), así como para insectos plaga como *Bemisia tabaci* (mosca blanca), *Frankliniella occidentalis* (trips) y *Tetranychus urticae* (araña roja).

Frente a este escenario, el manejo fitosanitario convencional basado principalmente en aplicaciones calendarizadas de plaguicidas ha demostrado ser insuficiente y contraproducente. Esta aproximación no solo genera incrementos sustanciales en los costos de producción –representando hasta el 40% de los costos variables totales, sino que además promueve la aparición de resistencias a insecticidas y fungicidas, reduce la biodiversidad funcional y genera riesgos significativos para la salud humana y ambiental. La necesidad de transitar hacia sistemas de producción más sostenibles y eficientes se ha convertido en una prioridad para el sector jitomatero mexicano.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se planteó como objetivo central realizar una evaluación integral del riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate bajo sistemas protegidos, abarcando desde la etapa de pre-siembra hasta la cosecha. La investigación incorporó tres componentes fundamentales: la modelación de la dinámica poblacional de plagas y enfermedades, la cuantificación de su impacto en el rendimiento y calidad del fruto, y el análisis costo-beneficio de las estrategias de control implementadas. Mediante un enfoque de Manejo Integrado de Plagas (MIP), se buscó establecer bases científicas para la optimización de las intervenciones fitosanitarias, reduciendo la dependencia de insumos sintéticos y mejorando la rentabilidad del cultivo.

El estudio se desarrolló en condiciones reales de producción en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, considerando tanto sistemas de invernadero de alta tecnología como macrotúneles, con el propósito de generar información aplicable y representativa de las condiciones productivas de la región. Los resultados obtenidos proporcionan no solo evidencia científica robusta sobre la eficacia de diferentes estrategias de control, sino también protocolos estandarizados de monitoreo y herramientas predictivas que permitirán a los productores tomar decisiones más fundamentadas y oportunas.

Esta investigación contribuye a cerrar la brecha existente entre el conocimiento científico y su aplicación práctica en el manejo fitosanitario del jitomate, representando un avance significativo hacia la sostenibilidad productiva del sector. Los hallazgos aquí presentados tienen el potencial de transformar las prácticas convencionales de control, estableciendo un nuevo paradigma basado en la prevención, el monitoreo sistemático y la intervención racional, que garantice tanto la viabilidad económica como la responsabilidad ambiental de la producción jitomatera en México.

1.2. Justificación

La implementación de este proyecto de investigación se sustenta en una triple justificación -técnica, económica y ambiental- que responde de manera integral a las problemáticas más apremiantes del sector jitomatero en sistemas protegidos. A nivel técnico, existe una evidente insuficiencia en las estrategias convencionales de manejo fitosanitario, caracterizadas por su enfoque reactivo y calendarizado. La falta de protocolos estandarizados de monitoreo y la carencia de herramientas predictivas para anticipar brotes epidemiológicos han generado un vacío crítico en la toma de decisiones, llevando a los productores a realizar aplicaciones preventivas excesivas o, por el contrario, intervenciones tardías e ineficaces. Esta situación se ve agravada por el limitado conocimiento sobre la dinámica poblacional de plagas y enfermedades bajo las condiciones microclimáticas específicas de invernaderos y macrotúneles, así como por la escasa comprensión de su interacción con la fenología del cultivo.(Jacobsen et al., 2022).

El desconocimiento de los patrones temporales de desarrollo de plagas clave y de la progresión de enfermedades bajo condiciones protegidas representa una limitante fundamental para la implementación efectiva de programas de Manejo Integrado de Plagas (MIP). Aunque existe consenso sobre la importancia del monitoreo, no se dispone de información precisa sobre los umbrales económicos dinámicos que consideren tanto el estado fenológico del cultivo como las condiciones ambientales específicas de cada sistema de producción (Pérez-García et al., 2023). Esta carencia de herramientas técnicas adaptadas a las condiciones locales obstaculiza la transición hacia sistemas de manejo más racionales y sostenibles.

Desde la perspectiva económica, las pérdidas atribuibles a problemas fitosanitarios en jitomate bajo sistemas protegidos alcanzan entre 30% y 100% del rendimiento potencial, dependiendo de la plaga o enfermedad, el momento de infestación y las condiciones de manejo (FAO, 2023). Estas mermas productivas, sumadas a los elevados costos asociados al control químico convencional -que puede representar hasta 12 aplicaciones de insecticidas y 15 de fungicidas por ciclo, comprometen

seriamente la rentabilidad del cultivo. Adicionalmente, la falta de análisis costo-beneficio específicos para las diferentes estrategias de control impide a los productores optimizar la asignación de recursos, generando tanto subinversión en medidas preventivas efectivas como sobreinversión en intervenciones curativas de eficacia limitada.

La justificación ambiental emerge como el tercer pilar fundamental de esta investigación. El uso intensivo de plaguicidas en los sistemas convencionales de producción ha generado externalidades negativas significativas, que incluyen la contaminación de suelos y acuíferos, la reducción de la biodiversidad funcional -especialmente de enemigos naturales- y la aparición de resistencias que reducen la eficacia de los principios activos (Stenberg, 2022). La transición hacia sistemas de manejo integrado se presenta no solo como una alternativa deseable, sino como una necesidad imperante para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la producción jitomatera. Sin embargo, esta transición requiere de evidencia científica sólida que demuestre su viabilidad técnica y económica bajo condiciones reales de producción.

La presente investigación aborda estas problemáticas mediante un enfoque integral que combina el monitoreo sistemático, la modelación de dinámicas poblacionales y el análisis económico. La implementación de un sistema estandarizado de monitoreo que incorpora trampeo cromático, muestreo estratificado y registro fenológico detallado permite establecer bases objetivas para la toma de decisiones. La aplicación de modelos matemáticos para describir y predecir el comportamiento de plagas y enfermedades en función de variables ambientales y fenológicas proporciona herramientas valiosas para la anticipación de brotes y la optimización del timing de las intervenciones. Finalmente, el análisis costo-beneficio de las diferentes estrategias de control implementadas ofrece a los productores criterios claros para la selección de las alternativas más eficientes y rentables.

La relevancia de este estudio trasciende el ámbito académico para posicionarse como una contribución concreta al desarrollo del sector jitomatero mexicano. Los protocolos y herramientas desarrollados tienen el potencial de ser adoptados por

productores, técnicos y asesores, facilitando la transición hacia sistemas de producción más sostenibles y eficientes. Además, los resultados obtenidos proporcionan insumos valiosos para el diseño de políticas públicas que fomenten la adopción de prácticas de manejo integrado, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con las demandas crecientes de los mercados internacionales por productos obtenidos mediante procesos ambientalmente responsables.

La investigación se justifica adicionalmente por su contribución al fortalecimiento de la seguridad alimentaria nacional. Al mejorar la eficiencia en el manejo fitosanitario y reducir las pérdidas por plagas y enfermedades, se incrementa la disponibilidad de un alimento básico en la dieta mexicana, reconocido por la Secretaría de Salud (2023) como componente fundamental de la dieta de la milpa. Asimismo, al reducir la dependencia de insumos sintéticos, se disminuye la exposición de agricultores y consumidores a residuos de plaguicidas, contribuyendo a la salud pública.

En el contexto del cambio climático, la investigación adquiere relevancia adicional al proporcionar herramientas para el manejo de estrés biótico bajo condiciones ambientales cambiantes. Los modelos desarrollados permiten comprender cómo las variaciones en temperatura y humedad afectan la dinámica de plagas y enfermedades, facilitando la adaptación del sector a nuevos escenarios climáticos.

Finalmente, la metodología empleada en este trabajo establece un precedente metodológico para la investigación aplicada en fitosanidad, integrando enfoques cuantitativos y cualitativos, técnicas estadísticas avanzadas y herramientas de modelación. Este marco metodológico puede ser replicado en otros cultivos y sistemas productivos, ampliando el impacto y alcance de la investigación.

En síntesis, esta investigación se justifica por su capacidad para generar conocimiento aplicable que permita superar las limitaciones técnicas, económicas y ambientales del manejo fitosanitario convencional en jitomate bajo sistemas protegidos. Los hallazgos aquí presentados representan un avance significativo hacia la construcción de un modelo productivo que armonice la rentabilidad económica con la sostenibilidad ambiental, garantizando la competitividad y viabilidad a largo plazo del sector jitomatero mexicano. La integralidad del enfoque, la robustez metodológica y la aplicabilidad práctica de los resultados constituyen aportes valiosos para el sector agroalimentario nacional en su conjunto

1.1. Planteamiento del problema

El cultivo de jitomate en sistemas protegidos se enfrenta a un problema central: su alta vulnerabilidad a plagas y enfermedades. Esta susceptibilidad altera negativamente la dinámica poblacional de los fitopatógenos, lo que se traduce en una reducción del rendimiento y la calidad comercial del fruto, generando pérdidas económicas significativas que limitan la sostenibilidad productiva.

Una de las causas subyacentes es la insuficiencia de las estrategias fitosanitarias convencionales. Las prácticas de control basadas principalmente en aplicaciones calendarizadas de plaguicidas han demostrado ser ineficientes, costosas y ambientalmente insostenibles. Esta situación crea una necesidad imperante de desarrollar e implementar sistemas de manejo integrado que combinen el monitoreo sistemático, el control biológico y las prácticas culturales, todo ello fundamentado en un análisis riguroso de la dinámica poblacional de plagas y enfermedades para una toma de decisiones oportuna y específica.

Sin embargo, la transición hacia este manejo integrado se ve obstaculizada por el limitado conocimiento científico sobre la dinámica poblacional de plagas y enfermedades en sistemas protegidos. Aunque se reconoce la importancia del monitoreo, existe un vacío de información que precise los patrones de crecimiento de plagas clave (como mosca blanca, minador y ácaros) y la progresión temporal de enfermedades (como tizones y virosis) bajo las condiciones microclimáticas particulares de invernadero y macrotúnel. Se desconoce de qué manera las variables ambientales (temperatura, humedad relativa) y la fenología del cultivo modulan las curvas de infestación y, en consecuencia, los umbrales económicos de intervención.

Además, persiste una incertidumbre sobre el impacto económico del riesgo fitosanitario y la rentabilidad del manejo integrado. Existe una brecha crítica en la cuantificación económica de las pérdidas causadas por plagas y enfermedades, así como en la relación costo-beneficio de implementar estrategias de manejo integrado frente a los enfoques convencionales. Se carece de datos precisos sobre el impacto

financiero de las intervenciones en la rentabilidad del cultivo, considerando tanto los costos de control como las mermas en rendimiento y calidad.

La convergencia de estos desafíos conduce a una problemática operativa fundamental: la ausencia de un protocolo estandarizado de monitoreo y modelación para la toma de decisiones. La transición del conocimiento científico a una herramienta agronómica aplicable requiere de un protocolo tecnificado. Actualmente, no se dispone de un sistema estandarizado que permita: i) integrar datos de dinámica poblacional con variables ambientales y fenológicas, ii) realizar una modelación predictiva para anticipar brotes epidemiológicos, y iii) determinar puntos críticos de intervención basados en umbrales económicos dinámicos. La definición de dicho protocolo es esencial para establecer recomendaciones concretas y accionables para los productores de jitomate en sistemas protegidos

2. Antecedentes

2.1. Cultivo de jitomate

2.1.1. Antecedentes del cultivo de jitomate

2.1.1.1. Importancia económica, social y agroalimentaria del jitomate en México.

En el ámbito social, la cadena productiva del jitomate es una fuente crucial de empleo en el campo mexicano. La agricultura protegida, bajo la cual se cultiva una gran parte del jitomate de exportación, ha permitido optimizar recursos y generar empleos especializados. Esta modernización ha sido impulsada por programas federales que buscan fortalecer la productividad y el desarrollo tecnológico del sector rural, impactando positivamente en las comunidades agrícolas (SADER, 2022).

El cultivo intensivo genera una significativa cantidad de jornales directos e indirectos, contribuyendo a la economía familiar en los estados productores. Para la economía nacional, siendo México el principal exportador mundial de esta hortaliza. Para el año 2022, las exportaciones de jitomate generaron ingresos por 2,491 millones de dólares, representando un volumen de 1.45 millones de toneladas y manteniendo una posición dominante en el mercado invernal de Estados Unidos (SIAP, 2023a).

Esta hortaliza ocupa el segundo lugar por valor de la producción hortícola nacional, solo superado por el chile verde, con una producción que supera los 4 millones de toneladas anuales (SIAP, 2023b).

Desde la perspectiva alimentaria y nutricional, el jitomate es fundamental en la dieta de los mexicanos. La Secretaría de Salud lo reconoce como un componente clave de la dieta de la milpa, un patrón alimentario tradicional y saludable que fomenta el consumo de productos vegetales nativos. Este patrón dietético es promovido para combatir los problemas de malnutrición y enfermedades crónicas en la población. Su consumo regular aporta vitaminas, minerales y fibra, contribuyendo a la

seguridad alimentaria y al bienestar nutricional en el país (Secretaría de Salud, 2023).

La producción de jitomate en México muestra una clara tendencia hacia la sostenibilidad y la eficiencia. A través de la Agricultura para el Bienestar y otros programas de extensionismo, el gobierno federal promueve prácticas agroecológicas que permiten a los productores optimizar el uso de agua y suelo, reducir la aplicación de insumos sintéticos y aumentar la rentabilidad de manera ambientalmente responsable. Este enfoque asegura la viabilidad a largo plazo de un cultivo vital para la economía y la alimentación nacional (SADER, 2023).

2.1.1.2. Características morfológicas y fisiológicas

El jitomate, *Solanum lycopersicum* L., pertenece a la familia Solanaceae, la misma de cultivos de gran importancia como la papa, el chile y la berenjena. Botánicamente, se clasifica como una planta herbácea, perenne en sus centros de origen tropical, pero que se cultiva como anual en las regiones templadas y subtropicales. Su sistema radicular es pivotante y muy ramificado, pudiendo extenderse hasta 1.5 metros de profundidad en condiciones de suelo óptimas, lo que le confiere una relativa tolerancia a sequías moderadas (Nuez, 2020).

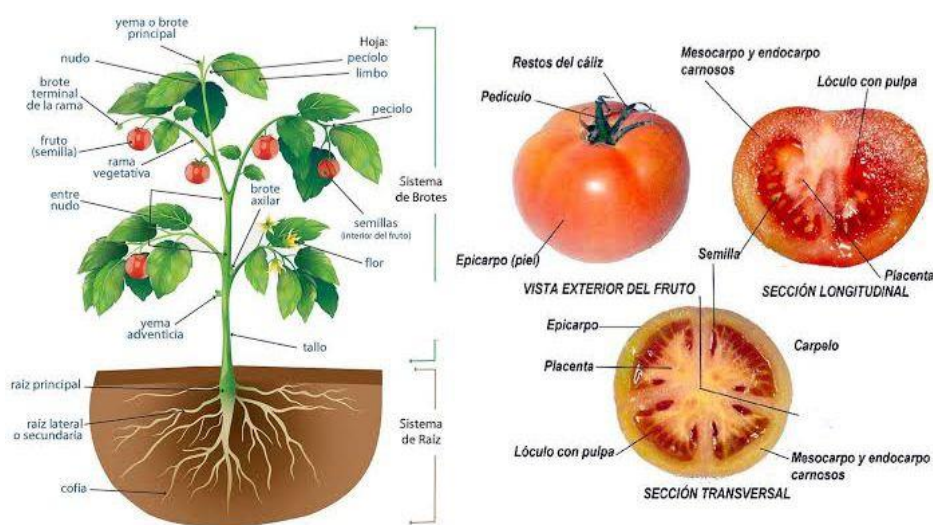


Figura 1 Morfología del cultivo de jitomate

2.1.1.3. Tallo y hojas

El tallo del jitomate es anguloso, velludo y de crecimiento inicialmente erecto, pero que se vuelve postrado conforme se desarrolla. Presenta un hábito de crecimiento indeterminado (crecimiento continuo), determinado (crecimiento limitado) o semi determinado, lo que define las prácticas de tutorado y manejo del cultivo. A lo largo del tallo, se forman hojas compuestas e imparipinnadas, con folíolos aserrados y cubiertos por tricomas glandulares que liberan aceites esenciales, responsables del aroma característico de la planta y que actúan como una defensa natural contra algunos insectos plaga (Gonzalez, 2022).

2.1.1.4. Floración

Las flores del jitomate son hermafroditas y se agrupan en inflorescencias conocidas como cimbras o racimos. Cada flor está compuesta por un cáliz con cinco sépalos verdes, una corola amarilla con cinco pétalos fusionados, y un androceo cuyas anteras forman un cono que rodea al gineceo. Esta estructura, donde el estigma está incluido dentro del cilindro de anteras, favorece la autogamia (autopolinización). No obstante, la vibración, ya sea por viento o por abejorros (*Bombus* spp.), es fundamental para liberar el polen y asegurar una fecundación eficiente, especialmente en invernaderos cerrados (Heuvelink, 2018).



Figura 2 Flor del jitomate

2.1.1.5 Fruto

El fruto del jitomate es una baya carnosa y jugosa, con una amplia variabilidad en forma, tamaño y color dependiendo del cultivar. Fisiológicamente, su desarrollo tras la fecundación se divide en varias fases: división celular, expansión celular y maduración. Durante la maduración, ocurren cambios bioquímicos críticos: la degradación de la clorofila, la síntesis de carotenoides (como el licopeno, que da el color rojo), la conversión de almidones en azúcares y la degradación de pectinas que ablandan el fruto. Este proceso está regulado por la producción de la hormona gaseosa etileno, que actúa como la señal principal para desencadenar la maduración (Taiz, Zeiger, Møller, & Murphy, 2018).

2.2. Manejo Fitosanitario por Etapas Fenológicas en el Cultivo de Jitomate

El manejo fitosanitario en el cultivo de jitomate requiere un enfoque diferenciado según las etapas fenológicas, ya que la susceptibilidad a plagas y enfermedades varía significativamente durante el desarrollo del cultivo. Esta revisión integra los conocimientos más recientes sobre estrategias de manejo específicas para cada fase del ciclo productivo.

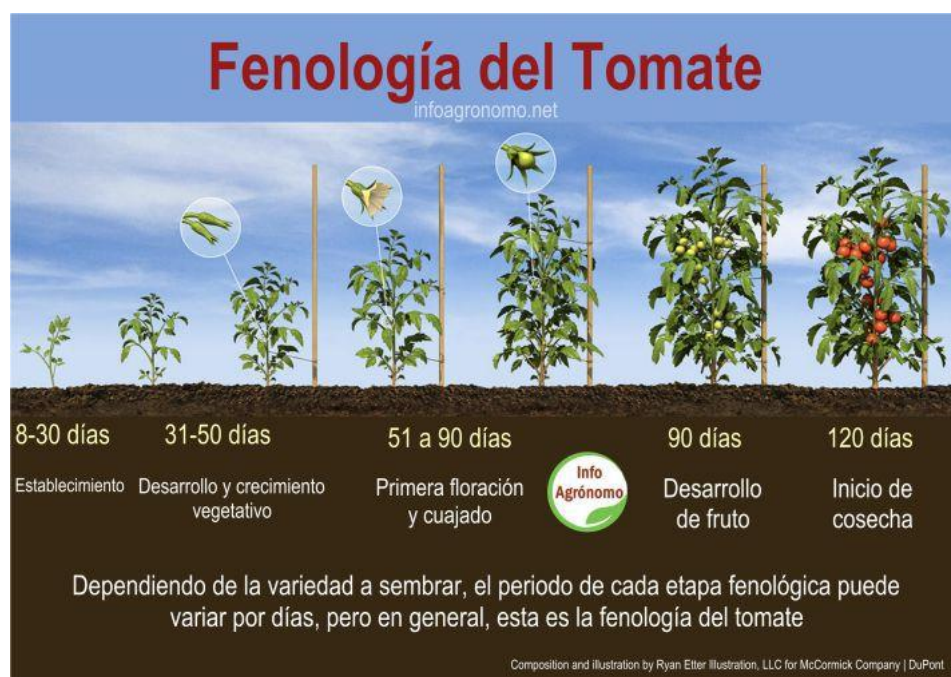


Figura 3 Etapas fenológicas

2.2.1. Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la Pre-siembra

La fase de pre-siembra es fundamental para establecer las bases de un cultivo sano y productivo. Las estrategias en esta etapa se enfocan en la prevención y la reducción del inóculo inicial de plagas y enfermedades, evitando así problemas mayores durante el desarrollo del cultivo (Pinto et al., 2021). Durante la etapa de pre-siembra, las estrategias se enfocan en la prevención y reducción del inóculo inicial. La selección de variedades resistentes constituye la primera línea de defensa, donde "el uso de híbridos modernos con genes de resistencia a virus, hongos y nematodos reduce significativamente el riesgo fitosanitario durante todo el ciclo" (Pérez et al., 2022, p. 17).

2.2.1.1 Selección del Sitio y Análisis de Suelo

La elección correcta del terreno es el primer paso para prevenir problemas fitosanitarios. Se debe evitar plantar en suelos donde se hayan cultivado solanáceas (tomate, papa, pimiento, berenjena) en los últimos 3-4 años, para reducir la acumulación de patógenos transmitidos por el suelo como *Fusarium oxysporum*, *Verticillium dahliae* y *Ralstonia solanacearum*. La desinfección de suelos y sustratos mediante técnicas como la solarización y biofumigación ha demostrado ser particularmente efectiva. Según Mendoza (2021), "la solarización durante 4-6 semanas en periodos de alta radiación reduce poblaciones de patógenos del suelo en un 70-90%" (p. 208). Complementariamente, "la aplicación de *Trichoderma harzianum* en sustratos antes del trasplante establece una barrera biológica que suprime el desarrollo de patógenos radiculares" (Mendoza, 2021, p. 215)

Un análisis de suelo previo permite determinar no solo la fertilidad, sino también la presencia de nematodos fitoparásitos como *Meloidogyne* spp., lo que posibilita la toma de decisiones tempranas. (Lamberti, 2020).

2.2.1.2. Selección de Variedades Resistentes y Tolerantes

El uso de variedades mejoradas con resistencia genética a plagas y enfermedades es una de las estrategias más eficaces y con menor impacto ambiental. Muchos híbridos modernos de jitomate poseen genes de resistencia a virus (como el Virus

del Mosaico del Tomate - ToMV), hongos (*Fusarium*, *Verticillium*) y nematodos (Perez et al., 2022).

Solarización: Técnica que utiliza la energía solar para pasteurizar el suelo, cubriéndolo con plástico transparente durante los periodos de mayor radiación. Es efectiva contra hongos, bacterias, nematodos y semillas de malas hierbas (Stapleton et al., 2020).

Biofumigación: Consiste en incorporar al suelo materias orgánicas (como estiércol, brásicas) que, al descomponerse, liberan gases biocidas. Es una alternativa sostenible que favorece la microbiota benéfica del suelo. (Stapleton et al., 2020).

Agentes de Control Biológico: La aplicación de hongos antagonistas como *Trichoderma harzianum* o bacterias como *Bacillus subtilis* en el suelo o sustrato antes del trasplante puede suprimir patógenos y promover el crecimiento de la planta (Mendoza, 2021).

2.2.1.3. Manejo de Plagas Cuarentenarias y Semillas Certificadas

La introducción de plagas cuarentenarias a través de semillas o plántulas infectadas es un riesgo crítico. Es imperativo el uso de semilla certificada, libre de patógenos. Para patógenos de alta peligrosidad como *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* (cáncer bacteriano) o Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV), se recomienda tratar la semilla con agua caliente (50°C durante 25-30 minutos) o con productos químicos/biológicos específicos autorizados (FAO, 2023).

2.2.1.4. Preparación del Terreno y Manejo de Restos de Cosecha Anterior

Una adecuada preparación del suelo, que incluya labranza para mejorar el drenaje y la aireación, crea condiciones menos favorables para el desarrollo de enfermedades radiculares. Es crucial eliminar y destruir (quemar o compostar correctamente) todos los restos vegetales de la cosecha anterior, ya que constituyen una fuente primaria de inóculo para el siguiente ciclo (Pinto et al., 2021).

2.2.2. Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la etapa vegetativa

Durante la floración y fructificación, el manejo debe proteger los órganos reproductivos sin afectar la polinización. El control de Tuta absoluta requiere estrategias específicas, ya que "las aplicaciones de *Bacillus thuringiensis* dirigidas a brotes nuevos y racimos florales reducen el daño en frutos en un 80%" (López et al., 2023, p. 34).

Para enfermedades fúngicas como *Botrytis cinerea*, "el manejo de la humedad relativa por debajo del 85% y la eliminación de pétalos senescentes adheridos a frutos reduce la incidencia de podredumbre gris en un 60%" (Poncet et al., 2021, p. 156). El control químico, cuando es necesario, debe ser selectivo, pues "la aplicación de fungicidas de origen biológico como *Ulocladium oudemansii* durante floración no afecta la actividad de polinizadores" (Poncet et al., 2021, p. 162).

2.2.3. Manejo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate en la etapa de maduración y cosecha

2.2.3.1. Protección de Frutos en Maduración

Durante la etapa de maduración, la protección de los frutos se convierte en la prioridad principal. "El manejo de enfermedades de fin de ciclo como *Phytophthora* spp. requiere aplicaciones dirigidas de fosfitos que activan mecanismos de defensa sistémicos en la planta durante las últimas etapas de desarrollo del fruto" (Lamberti, 2020, p. 58). Es fundamental implementar estrategias que minimicen el contacto de los frutos con el suelo y aseguren una adecuada aireación.

2.2.3.2. Control de Plagas de Fruto

El control de plagas que afectan directamente los frutos, como *Helicoverpa zea* y *Neoleucinodes elegantalis*, requiere enfoques específicos. "El monitoreo con trampas de feromonas específicas permite determinar el momento óptimo para aplicaciones de insecticidas selectivos cuando los frutos comienzan su cambio de color" (IRAC, 2022, p. 12). La implementación de cubiertas físicas o ensacado de racimos puede ser una alternativa efectiva en pequeñas escalas.

2.2.3.3. Manejo de Enfermedades de Poscosecha

La prevención de enfermedades que se manifiestan en poscosecha debe iniciarse en campo. "Las aplicaciones de *Bacillus amyloliquefaciens* en pre-cosecha reducen significativamente la incidencia de *Botrytis cinerea* y *Alternaria* spp. durante el almacenamiento" (Mendoza, 2021, p. 221). El manejo cuidadoso del riego y la nutrición durante esta etapa influye directamente en la vida de anaquel.

2.2.3.4 Respeto a Periodos de Carencia

El cumplimiento de los periodos de carencia es crítico para garantizar la inocuidad. "Las intervenciones fitosanitarias en pre-cosecha deben respetar escrupulosamente los periodos de carencia establecidos para cada producto, considerando un margen de seguridad adicional" (IRAC, 2022, p. 15). Esto es particularmente importante en cultivos de exportación donde los límites máximos de residuos son estrictos.

2.2.3.5 Manejo de Heridas y Daños Mecánicos

La minimización de daños mecánicos durante la cosecha es esencial. "Las heridas en el fruto durante la cosecha incrementan hasta un 300% la susceptibilidad a patógenos de poscosecha" (Poncet et al., 2021, p. 165). La implementación de protocolos de cosecha que incluyan el uso de tijeras adecuadas y el manejo cuidadoso de los frutos reduce significativamente las pérdidas.

2.2.3.6 Cosecha Selectiva y Clasificación

La cosecha selectiva y la clasificación en campo son estrategias clave. "La separación inmediata de frutos con síntomas de enfermedad o daño por plagas durante la cosecha previa la dispersión de patógenos en el empaque" (Gullino et al., 2020, p. 248). Esta práctica debe complementarse con la destrucción adecuada de los frutos descartados.

2.2.3.7 Condiciones Ambientales Óptimas para Cosecha

El manejo de las condiciones ambientales durante la cosecha influye en la calidad final. "La cosecha en horas frescas del día y el rápido enfriamiento de los frutos reducen la respiración y la susceptibilidad a patógenos" (López et al., 2023, p. 45).

Evitar la cosecha inmediatamente después de lluvias o riegos es igualmente importante.

2.3. Manejo fitosanitario en invernadero

En la fase vegetativa, el manejo se centra en el control de plagas foliares y enfermedades iniciales. El monitoreo sistemático es fundamental, ya que "la detección temprana de mosquita blanca (*Bemisia tabaci*) durante las primeras 3-4 semanas después del trasplante es crucial para prevenir daños posteriores y transmisión de virus" (Biondi et al., 2018, p. 245).

El control biológico aumentativo adquiere especial relevancia en esta etapa. Van Lenteren et al. (2018) reportan que "la liberación preventiva de *Amblyseius swirskii* a razón de 50-100 individuos/m² controla eficazmente huevos de mosquita blanca y trips en estados vegetativos tempranos" (p. 45). Para el control de áfidos, "la suelta de *Aphidius colemani* en focos iniciales de infestación previene su dispersión masiva" (van Lenteren et al., 2018, p. 47). 2020).

2.3.1.Exclusión y Prevención

El primer pilar del manejo en invernadero es el sistema de exclusión, que busca crear barreras físicas y protocolos de bioseguridad para evitar la entrada inicial de patógenos y plagas. Las técnicas clave incluyen la instalación de doble puerta y mallas antiáfidos en todas las ventilaciones, la desinfección obligatoria en los accesos a través de pediluvios y el control estricto del material vegetal, asegurando que las plántulas provengan de viveros certificados y que el sustrato esté desinfectado (Gullino et al., 2020).

2.3.2.Monitoreo y Detección Temprana

La base para la toma de decisiones es un sistema de monitoreo y detección temprana. Este sistema se implementa mediante técnicas de muestreo sistemático, como recorridos semanales en patrones definidos para revisar visualmente las plantas. Se complementa con el uso de trampas cromáticas amarillas para capturar insectos voladores como mosquitas blancas y áfidos, y trampas de feromonas

específicas para polillas como *Tuta absoluta*. La correcta identificación de plagas y síntomas es crucial para una intervención oportuna y efectiva (Biondi et al., 2018).

2.3.3. Control Ambiental

Un sistema de control ambiental que manipule el clima interior es fundamental para suprimir enfermedades. La técnica más crítica es el manejo de la humedad relativa, manteniéndola por debajo del 85% mediante ventilación y calefacción para evitar la condensación de agua en las plantas, condición necesaria para el desarrollo de hongos como *Botrytis*. Otras técnicas incluyen una adecuada ventilación para promover el movimiento de aire y un manejo preciso del riego por goteo, programado para las horas matutinas, con el objetivo de mantener el follaje seco (Poncet et al., 2021).

2.3.4. Control Biológico

El sistema de control biológico se basa en la liberación y conservación de enemigos naturales para regular las poblaciones de plagas clave. Este sistema se ejecuta mediante técnicas de liberación aumentativa de insectos benéficos específicos, como el parasitoide *Encarsia formosa* y el depredador *Amblyseius swirskii* para el control de mosquita blanca, o el ácaro depredador *Phytoseiulus persimilis* para combatir la araña roja. Además, se utilizan técnicas de aplicación de bioinsumos, como bacterias (*Bacillus thuringiensis*) y hongos antagonistas (*Trichoderma* spp.), para el control de larvas y enfermedades radiculares (van Lenteren et al., 2018).

2.3.5. Control Químico de Precisión

Cuando es estrictamente necesario, se implementa un sistema de control químico de precisión. Las técnicas racionales incluyen respetar los umbrales de acción establecidos por el monitoreo para evitar aplicaciones innecesarias. Es prioritario la selección de productos selectivos que preserven a los enemigos naturales y la rotación obligatoria de modos de acción (grupos IRAC y FRAC) para prevenir la resistencia. Finalmente, la tecnología de aplicación con equipos bien calibrados y boquillas que aseguren una cobertura óptima es una técnica esencial para maximizar la eficacia y minimizar el impacto (IRAC, 2022).

2.4. Manejo Fitosanitario en Macro Túneles

El manejo fitosanitario en macro túneles se basa en un sistema de protección intermedia que combina características del campo abierto y del invernadero. La técnica general fundamental es la optimización de las condiciones ambientales bajo la cubierta, integrada con un monitoreo intensivo y métodos de control biológico y cultural, minimizando la dependencia de plaguicidas (López et al., 2021).

2.4.1. Ventilación y Manejo del Microclima

El sistema de ventilación pasiva es la principal herramienta para el control de enfermedades en macro túnel. Este sistema se implementa mediante técnicas de diseño y manejo que incluyen la correcta orientación de la estructura (generalmente este-oeste) para aprovechar los vientos predominantes, la instalación de mallas laterales desplegadas y la selección de una cubierta plástica con propiedades anti-goteo para reducir la condensación y la humedad libre sobre el follaje, factores clave en el desarrollo de enfermedades fúngicas como el mildiu vellosa (Giménez, 2022).

2.4.2. Monitoreo Específico en Espacio Confinado

Debido al ambiente semi-confinado, se requiere un sistema de monitoreo más intensivo que en campo abierto. Las técnicas recomendadas incluyen la colocación estratégica de trampas cromáticas amarillas y azules a la altura del cultivo para capturar mosquitas blancas, áfidos y trips, respectivamente. El monitoreo visual debe enfocarse en las zonas de menor ventilación (extremos del túnel) y en el envés de las hojas, donde se inician la mayoría de las infestaciones de ácaros e insectos (López et al., 2021). La detección temprana de problemas como la Tuta absoluta es crítica, ya que el ambiente protegido puede favorecer su desarrollo más rápido que en el exterior (Biondi et al., 2018).

2.4.3. Control Biológico Adaptado

El sistema de control biológico en macro túnel debe adaptarse a las condiciones de semi-confinamiento, donde los enemigos naturales no pueden migrar tan fácilmente como en campo abierto. Las técnicas de liberación son similares a las de invernadero, pero requieren una mayor atención a la distribución de los auxiliares.

Se debe priorizar la suelta preventiva o inoculativa de ácaros depredadores como *Amblyseius swirskii* para control de trips y mosquita blanca, y de *Phytoseiulus persimilis* para araña roja, asegurando su establecimiento antes de que las plagas alcancen niveles altos (van Lenteren et al., 2018).

2.4.4. Manejo del Cultivo y Saneamiento

Un sistema de manejo del cultivo proactivo es esencial para reducir el inóculo y las fuentes de infestación. Las técnicas culturales más importantes son la poda y el despunte sanitario, retirando del interior del túnel todas las hojas bajas, brotes y frutos afectados o senescentes. Esto mejora la aireación y elimina focos de infección para enfermedades como *Botrytis cinerea* (Poncet et al., 2021). Además, la eliminación inmediata y correcta de las plantas altamente infectadas o con virosis es una técnica crucial para evitar la dispersión rápida de patógenos en un espacio confinado (Giménez, 2022).

2.4.5. Control Químico Selectivo y de Bajo Impacto

Cuando las intervenciones no químicas no son suficientes, se debe aplicar un sistema de control químico selectivo. Las técnicas clave incluyen la elección de productos compatibles con la fauna auxiliar, como los insecticidas de origen botánico (piretro, azadiractina) o microbiológico (*Bacillus thuringiensis*), y la aplicación localizada solo en los focos de infestación para preservar a los enemigos naturales en el resto del cultivo (IRAC, 2022). Es imperativo evitar las aplicaciones preventivas de amplio espectro, ya que el ambiente del macro túnel puede potenciar problemas de fitotoxicidad y resistencia (López et al., 2021).

2.5. Sistemas de Cultivo Macrotúneles vs. Invernaderos

La principal diferencia entre macrotúneles e invernaderos radica en su estructura y capacidad de control climático. Los macrotúneles son estructuras semicirculares, generalmente de 3 a 6 metros de altura, cubiertas con una malla o plástico, que carecen de sistemas activos de calefacción o enfriamiento. Su función principal es modificar parcialmente el microclima, protegiendo a los cultivos de factores abióticos

como lluvia, granizo y viento, y creando un efecto de "túnel de viento" que reduce la humedad relativa (Ponce et al., 2020).

Por el contrario, los invernaderos son estructuras de mayor altura (pueden superar los 5-6 metros en la cumbre) y suelen estar equipados con sistemas activos de control ambiental, como calefacción, ventilación mecánica, pantallas térmicas y enfriamiento evaporativo, lo que permite un manejo preciso de la temperatura, humedad y concentración de CO₂ durante todo el año (López et al., 2021).



Figura 4 Macrotunel



Figura 5 Invernadero

2.5.1. Inversión, Costos Operativos y Rentabilidad

La elección del sistema está fuertemente determinada por la disponibilidad de capital y el objetivo de producción. Los macrotúneles representan una inversión inicial significativamente menor en comparación con un invernadero de alta tecnología, lo que los hace accesibles para una gama más amplia de productores. Sin embargo, su menor control ambiental puede resultar en una producción estacional y rendimientos más variables, lo que impacta directamente en la estabilidad de los ingresos (Rodríguez et al., 2019). Los invernaderos, aunque requieren una inversión inicial y unos costos de operación (energía, mantenimiento) mucho más elevados, permiten una producción continua, fuera de estación, de mayor calidad y con rendimientos hasta 3-4 veces superiores por unidad de superficie, lo que puede traducirse en una mayor rentabilidad a largo plazo para cultivos de alto valor (López et al., 2021).

2.5.2. Manejo Fitosanitario y Sostenibilidad

El microclima generado dentro de cada sistema tiene implicaciones directas en la incidencia de plagas y enfermedades. Los macrotúneles, al tener una ventilación predominantemente pasiva y una menor capacidad para controlar la humedad, pueden ser propensos a la condensación en el plástico interior, creando condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fúngicas como el mildiu veloso (*Peronospora*) y la botritis (*Botrytis cinerea*) (Ponce et al., 2020). En los invernaderos de alta tecnología, el control activo de la humedad y la temperatura permite un manejo más preventivo de estas enfermedades. Además, la posibilidad de integrar mallas anti-insectos y sistemas de desinfección de aire y suelo los hace idóneos para programas de Manejo Integrado de Plagas (MIP) y producción con menores aplicaciones de plaguicidas, contribuyendo a una agricultura más sostenible y segura (López et al., 2021).

2.6. Impacto del Manejo Integrado en la Producción Sostenible del Jitomate

El Manejo Integrado de Plagas (MIP) constituye un pilar fundamental para la producción sostenible de jitomate, al reducir significativamente la dependencia de plaguicidas sintéticos. La aplicación de estrategias de MIP, que combinan el control

biológico, prácticas culturales y el monitoreo constante, ha demostrado una reducción de hasta un 75% en el uso de insecticidas de amplio espectro en cultivos bajo agricultura protegida. Esta reducción no solo mitiga el impacto ambiental, sino que también preserva a los enemigos naturales y reduce los riesgos de residuos en el fruto, contribuyendo directamente a la inocuidad alimentaria (López & Pérez, 2022).

La implementación del MIP impacta positivamente en la salud del suelo y la estabilidad del agroecosistema. Técnicas como la rotación de cultivos, el uso de variedades resistentes y la solarización del suelo, componentes clave del manejo integrado, suprimen patógenos transmitidos por el suelo y rompen los ciclos de vida de las plagas. Estas prácticas fomentan la biodiversidad del suelo y mejoran su estructura, lo que se traduce en plantas más vigorosas y resilientes. En consecuencia, los sistemas de jitomate manejados bajo este enfoque muestran una mayor sostenibilidad a largo plazo al depender menos de insumos externos y promover la autorregulación del ecosistema (González et al., 2023).

Desde una perspectiva económica y social, la adopción del MIP genera beneficios tangibles para los productores y las comunidades rurales. Aunque la transición inicial puede requerir una mayor inversión en conocimiento y asistencia técnica, los costos de producción a mediano plazo se estabilizan o reducen al disminuir la compra de plaguicidas. Además, los agricultores y jornaleros están menos expuestos a sustancias tóxicas, mejorando las condiciones de seguridad laboral. La producción de un alimento más seguro y de mayor calidad también abre oportunidades en mercados de exportación y nichos que valoran la sostenibilidad, fortaleciendo así la competitividad de la cadena productiva del jitomate (Martínez et al., 2021).

2.6.Riesgo Fitosanitario en el Cultivo de Jitomate

2.6.1. Riesgo fitosanitario

El riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate es la probabilidad de introducción, establecimiento o dispersión de una plaga o enfermedad en un área determinada,

considerando tanto la probabilidad de ocurrencia como la magnitud de la severidad de sus impactos biológicos y económicos asociados . Esta evaluación constituye un componente fundamental de la protección vegetal moderna, ya que permite priorizar las amenazas y asignar recursos de manera eficiente para la vigilancia y el control, basándose no solo en la presencia de un agente dañino, sino en su potencial de causar perjuicios significativos al cultivo (FAO, 2023).

La probabilidad de ocurrencia y la severidad de las principales plagas y enfermedades del jitomate están influenciadas por un complejo de factores bióticos, abióticos y de manejo. Entre los patógenos de mayor impacto se encuentra el virus del rizado amarillo del tomate (TYLCV), transmitido por la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), cuya epidemia puede ser severa en regiones con altas poblaciones del vector y ausencia de variedades resistentes . De igual manera, enfermedades como el mildiu veloso (*Phytophthora infestans*) y la mancha bacteriana (*Xanthomonas* spp.) presentan una alta probabilidad de desarrollo bajo condiciones de humedad relativa elevada y temperaturas moderadas, pudiendo causar pérdidas totales si no se manejan a tiempo (Jones, 2022).

La gestión efectiva del riesgo fitosanitario requiere un enfoque proactivo y sistemático. La implementación de estrategias de Manejo Integrado de Plagas (MIP), que combinan el uso de semillas certificadas, monitoreo constante, control biológico, prácticas culturales y la aplicación precisa de plaguicidas solo cuando se superan los umbrales económicos de daño, es la estrategia más recomendada para reducir tanto la probabilidad de ocurrencia como la severidad de los daños. La adopción de estas prácticas sostenibles mitiga el riesgo, reduce la dependencia de insumos sintéticos y contribuye a la seguridad alimentaria al minimizar las pérdidas en la producción (Dara, 2023).

2.7.Riesgo Fitosanitario en Invernadero y Macrotúneles

2.7.1. Riesgo Fitosanitario en Invernadero

Las condiciones de invernadero presentan características únicas que modifican sustancialmente la presión de plagas y enfermedades. La estabilidad ambiental y el

aislamiento parcial crean escenarios específicos para el desarrollo fitosanitario (Pérez-García et al., 2023).

2.7.2. Factores que Aumentan el Riesgo

El ambiente controlado favorece el desarrollo de ciertas plagas mediante condiciones óptimas constantes. La temperatura estable y alta humedad relativa permiten la reproducción acelerada de ácaros como *Tetranychus urticae*, que puede completar su ciclo vital en 7-10 días en condiciones favorables (Liu et al., 2022). La ausencia de enemigos naturales nativos y la protección contra condiciones climáticas adversas facilitan que plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) se establezcan permanentemente y actúen como vectores constantes de virus (Gilbertson et al., 2021).

La alta densidad de plantación y la reducida amplitud térmica crean microclimas favorables para enfermedades fúngicas como *Botrytis cinerea*, que prolifera con humedades relativas superiores al 85% (Williamson et al., 2021). La limitada circulación de aire y la ausencia de lluvia facilitan la persistencia de conidias de oídio (*Oidium lycopersici*) en el ambiente (Jones et al., 2023).

2.7.3. Factores que Disminuyen el Riesgo

El carácter cerrado permite implementar estrategias de control altamente efectivas. La exclusión física mediante mallas antiinsectos puede reducir hasta en 90% la entrada de plagas cuando se selecciona el tamaño de malla adecuado (Dader et al., 2022). El control biológico alcanza máxima eficacia al poder establecer poblaciones estables de enemigos naturales como *Amblyseius swirskii* sin sufrir deriva por condiciones climáticas adversas (van Lenteren, 2023).

El control preciso de la humedad relativa por debajo del 80% mediante ventilación y calefacción permite crear condiciones desfavorables para la esporulación de patógenos, mientras que el manejo exacto del riego evita el mojado foliar (Pérez-García et al., 2023).

2.7.4. Riesgo Fitosanitario en Macrotúneles

Los macrotúneles presentan condiciones intermedias entre campo abierto e invernadero, con características fitosanitarias particulares (Moreno et al., 2022).

2.7.5. Factores que Aumentan el Riesgo

La menor hermeticidad comparada con invernadero permite el ingreso de plagas migratorias como trips y áfidos, mientras mantiene condiciones que favorecen su desarrollo (Lacasa et al., 2023). La condensación en la cubierta plástica crea microclimas de alta humedad que favorecen enfermedades como *Botrytis cinerea* y *Oidium* spp., particularmente en periodos de baja ventilación (Fernández et al., 2022).

La ventilación limitada y las temperaturas más elevadas que en campo abierto crean condiciones ideales para el desarrollo de araña roja, que encuentra en macrotúneles un ambiente protegido de lluvias y vientos (López et al., 2023).

2.7.6. Factores que Disminuyen el Riesgo

La protección contra lluvia reduce la incidencia de enfermedades favorecidas por mojado foliar como el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) y bacteriosis (Wang et al., 2022). La menor amplitud térmica respecto al campo abierto reduce el estrés de las plantas, aumentando su resistencia natural a plagas y enfermedades (Moreno et al., 2022).

La posibilidad de instalar mallas laterales permite exclusión parcial de plagas mientras mantiene cierta ventilación natural, reduciendo los problemas de condensación (Lacasa et al., 2023). La estructura semi-abierta facilita el establecimiento de enemigos naturales nativos, proporcionando control biológico adicional (Fernández et al., 2022).

2.8. Principales plagas y enfermedades del jitomate

2.8.1. Plagas del Tomate

Araña Roja (*Tetranychus urticae*)

En el tomate, la araña roja es una plaga que se desarrolla principalmente en condiciones de calor y baja humedad. Estos ácaros se localizan en el envés de las hojas, donde perforan las células para alimentarse. El daño inicial se manifiesta como un punteado o moteado clorótico en el haz de la hoja, que puede evolucionar a un bronceado generalizado, desecación y defoliación severa. En infestaciones fuertes, se observan finas telarañas que cubren los brotes. Esta afectación directa a la área foliar reduce la capacidad fotosintética de la planta, lo que se traduce en una disminución del número y el tamaño de los frutos, así como en el riesgo de daño por golpe de sol al quedar estos expuestos (Van Leeuwen et al., 2022).

Mosca Blanca (*Bemisia tabaci*)

Bemisia tabaci es un vector de virus extremadamente dañino para el tomate. Los daños directos, causados por la succión de savia de ninfas y adultos en el envés de las hojas, pueden debilitar la planta y favorecer la presencia de "fumagina" (un moho negro que crece sobre la melaza que excretan), lo que ensucia los frutos y reduce further la fotosíntesis. No obstante, el impacto económico más severo se debe a su capacidad de transmitir virus, principalmente los begomovirus que causan el Virus del Rizado Amarillo del Tomate (TYLCV). Una planta infectada por TYLCV muestra un crecimiento achaparrado y hojas pequeñas, cloróticas y enrolladas hacia arriba, lo que virtualmente detiene la producción de frutos comerciales (Gilbertson et al., 2021).

Minador de la hoja (*Liriomyza* spp.)

El minador de la hoja (*Liriomyza* spp.) es una plaga clave en el cultivo de jitomate, cuyas larvas se alimentan del mesófilo foliar, reduciendo la capacidad fotosintética de la planta y afectando directamente el rendimiento. (León et al. 2023)

Trips (*Frankliniella occidentalis*)

Los trips son plagas clave en el cultivo de tomate debido al daño directo y, sobre todo, a su rol como vectores. El daño directo por su alimentación raspadora causa cicatrices plateadas o bronceadas en los frutos (conocido como "piel de plata"), depreciando completamente su valor comercial. Además, deforman flores y hojas

jóvenes. Sin embargo, su mayor peligro radica en la transmisión del Virus del Bronceado del Tomate (TSWV). Un tomate infectado con TSWV puede mostrar anillos cloróticos o necróticos en los frutos, que se vuelven no comercializables, y manchas bronceadas en el follaje (Riley et al., 2022). Su control es complejo porque se refugian dentro de las flores y botones, donde los insecticidas de contacto tienen dificultad para llegar (Reitz, 2021).

2.8.2. Enfermedades del Tomate

Tizón Tardío (*Phytophthora infestans*)

El tizón tardío es la enfermedad más devastadora del tomate a nivel global. Causada por el oomiceto *Phytophthora infestans*, se caracteriza por la rápida aparición de grandes manchas de color verde oscuro a marrón negro en hojas y tallos. Bajo alta humedad ambiental, se forma un moho blanco algodonoso en el envés de estas lesiones. Los frutos también son afectados, mostrando manchas firmes, de color marrón oscuro y aspecto grasiento. La enfermedad puede destruir un cultivo en menos de una semana bajo condiciones favorables (fresco y húmedo), haciendo esencial un manejo preventivo que combine fungicidas específicos y variedades con resistencia genética (Fry & Goodwin, 2021; Nowicki et al., 2022).

Tizón Temprano (*Alternaria solani*)

El tizón temprano es una enfermedad fúngica común y destructiva en el tomate. Sus síntomas típicos son lesiones foliares circulares con un patrón concéntrico de anillos oscuros, similar a una diana. Estas lesiones suelen aparecer primero en las hojas más viejas y basales. A medida que la enfermedad progresa, causa una defoliación severa que comienza desde la base de la planta hacia arriba. Esta defoliación expone los frutos al sol, pudiendo causarle quemaduras, y reduce el llenado y tamaño de los tomates. La enfermedad se ve favorecida por periodos de rocío prolongado y por plantas bajo estrés nutricional o hídrico (Mandal et al., 2021).

Virus del Mosaico del Tomate (ToMV)

El Virus del Mosaico del Tomate (ToMV) es un tobamovirus muy estable y contagioso. Los síntomas incluyen un mosaico o moteado de color verde claro y

oscuro en las hojas, que a menudo se deforman, mostrando enrollamientos y un aspecto filodio (similar a un helecho). Las plantas infectadas pueden presentar crecimiento atrofiado y los frutos maduran de manera irregular, con manchas amarillas y reducción de su tamaño. El virus se transmite con facilidad por contacto mecánico (manos, herramientas, ropa) y a través de semillas infectadas, lo que hace fundamental el uso de semilla certificada y las medidas de higiene estrictas en el invernadero o campo (Hanssen & Lapidot, 2021).

Marchitez por *Fusarium* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*)

Esta enfermedad, causada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, es un patólogo vascular del suelo. El hongo penetra por las raíces y coloniza el sistema vascular (xilema) de la planta, obstruyendo el flujo de agua. Los síntomas característicos incluyen un amarillamiento de las hojas más viejas que comienza en los bordes y avanza hacia el interior, seguido de una marchitez que inicialmente se recupera por la noche pero que se vuelve permanente, culminando con la muerte de la planta. Al realizar un corte longitudinal del tallo, se observa un marcado oscurecimiento marrón de los haces vasculares. El manejo más efectivo es el uso de variedades resistentes, identificadas con los códigos F1, F2, F3, que corresponden a las razas del patógeno (Dean et al., 2022).

Marchitez por *Verticillium* (*Verticillium dahliae*)

Al igual que *Fusarium*, *Verticillium dahliae* es un hongo del suelo que causa una marchitez vascular en el tomate. Sin embargo, sus síntomas suelen ser menos agresivos y de progresión más lenta. Se manifiesta inicialmente como un amarillamiento y posterior necrosis entre los nervios de las hojas más viejas (síntoma en "V"), lo que progresa hacia la parte superior de la planta. También causa marchitez y defoliación. Internamente, también se presenta un oscurecimiento vascular, aunque a veces menos intenso que el de *Fusarium*. La enfermedad es más problemática en regiones con climas templados o frescos, y su manejo se basa en la resistencia genética (usando portainjertos resistentes) y la rotación de cultivos con gramíneas (Klosterman et al., 2021).

2.9. Factores que Influyen en la Incidencia de Plagas y Enfermedades en Jitomate

La incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de jitomate está determinada por la interacción de diversos factores agronómicos y ambientales que pueden favorecer o suprimir el desarrollo de problemas fitosanitarios. El manejo integrado de estos factores es fundamental para mantener la sanidad del cultivo (Jacobsen et al., 2022).

2.9.1. Clima

El clima constituye el factor abiótico más influyente en la epidemiología de enfermedades y la dinámica poblacional de plagas. La temperatura regula directamente el desarrollo de insectos y patógenos; por ejemplo, la araña roja (*Tetranychus urticae*) prolifera en condiciones de calor y baja humedad (Van Leeuwen et al., 2022), mientras que el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) se desarrolla óptimamente en temperaturas frescas (10-25°C) con alta humedad relativa (Nowicki et al., 2022). Los periodos prolongados de mojado foliar son esenciales para la germinación de esporas de hongos como *Alternaria solani*, siendo críticos para el desarrollo del tizón temprano (Mandal et al., 2021).

2.9.2. Manejo de Riego y Nutrición

El manejo del agua y los nutrientes afecta tanto la susceptibilidad de la planta como el microclima del cultivo. El riego por aspersión, que moja el follaje, crea condiciones favorables para la esporulación y penetración de patógenos, mientras que el riego por goteo reduce significativamente la incidencia de enfermedades foliares al mantener el follaje seco (Panth et al., 2020). La nutrición desbalanceada, particularmente el exceso de nitrógeno, produce un crecimiento vegetativo exuberante que atrae plagas como mosca blanca y crea un dosel denso que mantiene la humedad, mientras que la deficiencia de potasio debilita las defensas naturales de la planta contra patógenos (Datnoff et al., 2021).

2.9.3. Densidad de Cultivo

La densidad de plantación influye directamente en el microclima dentro del dosel. Una alta densidad de plantas resulta en un follaje más espeso y menor circulación de aire, lo que reduce la tasa de secado del rocío o la lluvia en las hojas y extiende los períodos de mojado foliar, condiciones ideales para el desarrollo de enfermedades fúngicas (Lamichhane et al., 2020). Además, la alta densidad facilita el movimiento de plagas como trips y ácaros entre plantas.

2.9.4. Rotación de Cultivos

La rotación de cultivos es fundamental para el manejo de patógenos habitantes del suelo. El cultivo continuo de jitomate en el mismo terreno conduce a la acumulación de inóculo de patógenos específicos como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y *Verticillium dahliae*. La rotación con cultivos no huéspedes interrumpe el ciclo de vida del patógeno al privarlo de su planta hospedera, reduciendo progresivamente los niveles de inóculo en el suelo. La efectividad de esta práctica depende de la elección de especies rotativas y la duración del período sin el cultivo huésped (Jacobsen et al., 2022).

2.10. Dinámica poblacional

2.10.1 Dinámica poblacional y su importancia para la predicción de brotes

La dinámica poblacional es la rama de la ecología que estudia los cambios en el número, tamaño, composición y distribución geográfica de las poblaciones a lo largo del tiempo, así como las causas (factores biológicos y ambientales como natalidad, mortalidad, inmigración y emigración) que los provocan (McGovern, 2021).

2.10.2.Importancia para la predicción de brotes

La importancia fundamental de estudiar la dinámica poblacional radica en la identificación temprana de riesgos, donde el monitoreo constante y el análisis de parámetros como densidad y distribución permiten detectar aumentos inusuales en las poblaciones de plagas antes de que alcancen niveles de brotes incontrolables (Martínez & Caballero, 2021). Estos datos de campo se integran en modelos predictivos que, al incorporar variables como natalidad, mortalidad y factores

climáticos, determinan el momento óptimo para realizar intervenciones fitosanitarias, evitando así aplicaciones tardías o innecesarias y maximizando su eficacia (Pérez-Moreno & Hernández, 2022).

2.10.3. Optimización del Control Biolológico y el MIP

La comprensión de la dinámica poblacional es crucial para la optimización del control biológico, ya que el análisis de la interacción entre una plaga y sus enemigos naturales permite planificar estrategias de liberación o conservación que aseguren poblaciones suficientes de agentes benéficos para regular eficazmente las plagas (López et al., 2023). Este conocimiento constituye un pilar fundamental del Manejo Integrado de Plagas (MIP), un enfoque que utiliza diversas técnicas de forma compatible para mantener las poblaciones de plagas por debajo del nivel de daño económico, promoviendo la sostenibilidad agrícola (Martínez & Caballero, 2021).

2.10.4.Reducción de Pérdidas y Costos mediante la Cuantificación

La capacidad de predecir brotes a través del estudio de la dinámica poblacional permite a los agricultores reducir pérdidas y costos significativamente, ya que la acción oportuna basada en pronósticos confiables minimiza las mermas en el rendimiento y optimiza el uso de insumos como pesticidas y agua (Pérez-Moreno & Hernández, 2022). Para cuantificar y predecir el comportamiento de las plagas con precisión, se emplea la modelación matemática y estadística a través de herramientas como los modelos de grados-día, que estiman parámetros clave como la tasa intrínseca de crecimiento y el potencial de daño, pudiendo incluso integrarse con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para mapear el riesgo de infestación a nivel regional (Pérez-Moreno & Hernández, 2022).

2.10.5.Factores que Gobiernan la Dinámica Poblacional

La dinámica de las poblaciones de plagas no es aleatoria, sino que está gobernada por una compleja interacción de factores bióticos y abióticos. Entre los factores abióticos, la temperatura y la humedad relativa son determinantes, ya que afectan directamente las tasas de desarrollo, reproducción y supervivencia de insectos y patógenos (Martínez & Caballero, 2021). Por el lado de los factores bióticos, la

disponibilidad de alimento (estado fenológico del cultivo) y, de manera crucial, la presión ejercida por los enemigos naturales (depredadores, parasitoides) pueden suprimir naturalmente las poblaciones de plagas, estabilizando así el agroecosistema cuando se manejan adecuadamente (López et al., 2023).

2.10.5. Aplicación Práctica en Cultivos de Alto Valor

Un ejemplo paradigmático de la aplicación exitosa de estos principios se observa en cultivos de alto valor como el jitomate bajo invernadero. En este sistema, plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) pueden causar pérdidas devastadoras, pero mediante el monitoreo continuo y el uso de modelos de grados-día es posible predecir con precisión sus picos de infestación (López et al., 2023). Esta capacidad predictiva permite la implementación de un manejo integrado sincronizado, donde decisiones como la suelta del parasitoide *Encarsia formosa* o la aplicación de bioplaguicidas se realizan en el momento óptimo, maximizando la eficacia del control y minimizando tanto los costos como el impacto ambiental (López et al., 2023)

2.10.6. Riesgo fitosanitario

El riesgo fitosanitario constituye uno de los factores limitantes más significativos para el rendimiento del jitomate (*Solanum lycopersicum*), con pérdidas que pueden oscilar entre 30% y 100% según la plaga o enfermedad, el momento de infestación y las condiciones de manejo del cultivo (FAO, 2023). La relación entre la presión de plagas y enfermedades y la productividad del cultivo sigue patrones complejos que involucran mecanismos fisiológicos, ecológicos y agronómicos.

2.10.7.. Mecanismos de Reducción del Rendimiento

Las plagas y enfermedades afectan el rendimiento mediante múltiples mecanismos interdependientes. El daño foliar por plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y ácaros (*Tetranychus urticae*) reduce la capacidad fotosintética de la planta, limitando la producción de fotoasimilados necesarios para el llenado de frutos (Liu et al., 2022). Esta reducción en la actividad fotosintética puede disminuir el

rendimiento entre 40-60%, dependiendo de la intensidad y duración del ataque (Zhang et al., 2023).

Las enfermedades vasculares como *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y *Verticillium dahliae* alteran la fisiología de la planta al obstruir el sistema vascular, reduciendo el transporte de agua y nutrientes. Esto se traduce en marchitez, reducción del área foliar y disminución en el número y tamaño de frutos, con pérdidas que pueden alcanzar 80% en variedades susceptibles (McGovern, 2021).

2.10.8. Impacto Económico y Calidad Comercial

Las pérdidas no solo se manifiestan en cantidad sino también en calidad comercial. Los virus transmitidos por insectos, particularmente el Virus del Rizado Amarillo del Tomate (TYLCV) y el Virus del Mosaico del Tomate (ToMV), causan deformaciones y alteraciones en la coloración de los frutos que los hacen no comercializables (Hanssen & Lapidot, 2021). Estudios económicos indican que las infecciones virales pueden reducir el valor comercial en 60-100%, incluso cuando la reducción en peso es solo del 30% (Gómez et al., 2022).

El daño directo a frutos por plagas como trips (*Frankliniella occidentalis*) y enfermedades como *Botrytis cinerea* afecta particularmente la calidad de poscosecha, reduciendo la vida útil y aumentando las pérdidas durante el almacenamiento y transporte (Williamson et al., 2021).

2.10.9. Efectos Sinérgicos y Umbrales Críticos

La interacción entre múltiples estreses fitosanitarios genera efectos sinérgicos que multiplican las pérdidas. Plantas infectadas con virus son más susceptibles a infecciones fúngicas secundarias, mientras que el daño por insectos facilita la entrada de patógenos (Stout et al., 2022). La combinación de estrés biótico y abiótico, como alta presión de plagas con deficiencias nutricionales, puede exacerbar las pérdidas hasta niveles catastróficos (95-100%) cuando ocurren en etapas fenológicas críticas como floración y cuajado (Petzoldt & Seaman, 2023).

2.11. Manejo integrado de plagas y enfermedades (MIP) en jitomate

2.11.1. Manejo integrado de plagas y enfermedades

El MIP en jitomate se sustenta en cuatro principios fundamentales: monitoreo continuo, toma de decisiones basada en umbrales económicos, prevención como estrategia primaria y combinación sinérgica de métodos de control (Dara, 2022). Este enfoque reconoce que la erradicación completa de plagas y enfermedades no es necesaria ni deseable, sino que se busca un manejo racional que preserve la biodiversidad y la sostenibilidad del agroecosistema (Stenberg, 2022).

2.11.2. Estrategias de Monitoreo y Diagnóstico

El monitoreo sistemático constituye la base del MIP exitoso. La implementación de trampas cromáticas amarillas para mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y áfidos, trampas azules para trips (*Frankliniella occidentalis*), junto con inspecciones visuales semanales del 2-5% de las plantas, permite la detección temprana de infestaciones (Liu et al., 2023). El diagnóstico preciso de enfermedades mediante kits serológicos o técnicas moleculares facilita la implementación oportuna de medidas de control específicas (Panno et al., 2021) 1. Eliminar Fuentes de Inóculo (Principio Fundamental).

2.12. Estrategias de prevención

2.12.1. Selección Genética y Uso de Variedades Resistentes

Esta estrategia fundamental implica la utilización de material vegetal con resistencia genética a patógenos prevalentes en la región. Incluye la selección de variedades resistentes a enfermedades como *Fusarium oxysporum*, *Verticillium dahliae* y virus como el ToBRFV, así como la elección de portainjertos resistentes en sistemas de injerto. La evaluación del comportamiento sanitario en condiciones locales específicas permite reducir significativamente la vulnerabilidad inicial del cultivo y disminuir la dependencia de intervenciones correctivas posteriores (Rodríguez et al., 2023).

2.12.2.Saneo fitosanitario

Las plantas o frutos gravemente enfermos actúan como "bombas" o focos de inóculo (esporas, bacterias, virus) dentro del cultivo. Una planta de jitomate con un cancro bacteriano libera millones de bacterias que son salpicadas por el riego o la lluvia a las plantas vecinas. Al removerla, se elimina la fuente principal de dispersión. Interrumpir el Ciclo de Vida de Plagas y Patógenos. Al eliminar el tejido infectado o infestado, se priva al patógeno o plaga de su sustrato para alimentarse, reproducirse y completar su ciclo. Esto es crucial para reducir la presión de infección en el siguiente ciclo del cultivo o en las etapas fenológicas siguientes. (Wang et al., 2016).

Una planta dedica energía y nutrientes a defenderse de una infección avanzada. Al eliminar las hojas o frutos dañados, o la planta completa, se redirigen esos recursos hacia el desarrollo de tejidos sanos, el crecimiento vegetativo y la producción de frutos de calidad. (Fernández & Mendoza, 2023).

El saneo no es una pérdida, sino una inversión en la salud general del cultivo. Es una de las prácticas más costo-efectivas dentro del Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIP), ya que reduce la dependencia de insumos externos y protege la rentabilidad del cultivo al preservar el rendimiento y la calidad de la cosecha. con aplicación de sulfato de cobre (Fernández & Mendoza, 2023).

2.12.3.Manejo del Ambiente Protegido

Esta estrategia utiliza la modificación ambiental para crear condiciones desfavorables al desarrollo de plagas y enfermedades. Comprende el control preciso de temperatura y humedad relativa para evitar condiciones propicias para enfermedades fúngicas, ventilación activa para reducir periodos de mojado foliar, manejo de radiación solar mediante encalados o mallas de sombreo, y diseño de invernaderos que favorezcan el movimiento de aire. La segregación espacial según edades fenológicas complementa esta aproximación preventiva (Torres et al., 2023).

2.12.4.Implementación de Barreras Físicas y Sistemas de Exclusión

La instalación de barreras físicas previene el ingreso de plagas mediante mallas antiinsectos específicas según el tipo de plaga, sistemas de dobles puertas en accesos y vestíbulos de desinfección para personal y equipos. Incluye cerramientos herméticos en laterales y cubreras, así como el uso de trampas físicas en perímetros como barreras adicionales. Estas estructuras constituyen la primera línea de defensa contra la entrada de insectos vectores al sistema de producción (Silva et al., 2024).

2.12.5.Preparación y Manejo del Suelo o Sustrato

Esta estrategia se enfoca en reducir el inóculo inicial en el medio de crecimiento mediante técnicas de solarización durante periodos de alta radiación y biofumigación con brassicáceas para control de patógenos del suelo. Incluye desinfección con vapor en sistemas sin suelo, aplicación de microorganismos antagonistas como *Trichoderma* spp. y *Bacillus subtilis*, y análisis biológico del suelo para determinar cargas microbianas. Estas prácticas establecen las bases para un inicio sanitariamente favorable del cultivo (García-López et al., 2024).

2.12.6.Planificación y Diseño del Sistema Productivo

La planificación estratégica anticipa y mitiga riesgos fitosanitarios mediante la programación de fechas de siembra para evitar periodos de alta presión de plagas y el diseño de densidades de plantación que favorezcan la ventilación. Incluye planes de rotación con cultivos no hospedantes, establecimiento de perímetros de seguridad con vegetación no hospedante y delimitación de áreas de cuarentena para material vegetal nuevo. Esta aproximación integral previene problemas antes de la instalación del cultivo (Rodríguez et al., 2023).

2.12.7.Herramientas de modelación y monitoreo Invernadero y Macro túnel

El desarrollo de modelos predictivos representa una herramienta fundamental para el manejo fitosanitario en ambientes protegidos. La implementación de sistemas de modelado microclimático permite anticipar condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades mediante el uso de software especializado que proyecta temperatura, humedad y punto de rocío, parámetros críticos para prevenir patógenos como *Botrytis cinerea* (Körner & Hansen, 2022). Estos modelos mecanicistas se basan en ecuaciones de balance energético-hídrico que predicen la dinámica de humedad foliar, factor determinante en el desarrollo de enfermedades fúngicas en cultivos bajo cubierta (Ponce, 2023).

La integración de plataformas IoT constituye otro avance significativo, mediante la implementación de sistemas de redes de sensores inalámbricos para medición continua de variables fitosanitarias. Estas tecnologías incluyen nodos multisensores que miden simultáneamente temperatura foliar, humedad del sustrato y actividad de insectos, transmitiendo datos mediante tecnologías de bajo consumo como LoRaWAN, especialmente útiles en macro túneles remotos (Moltó et al., 2021). La aplicación de modelos de desarrollo de plagas basados en grados-día completa este enfoque, utilizando umbrales térmicos para predecir generaciones de plagas clave como *Tuta absoluta* y *Bemisia tabaci*, integrados en plataformas como GreenModel-Pest que combinan datos climáticos con curvas de desarrollo de insectos (López-Cruz et al., 2023).

2.12.8.Sistemas de Monitoreo para Invernadero y Macro túnel

Los sistemas de monitoreo en ambientes protegidos requieren estrategias de muestreo estructurado que permitan la detección temprana de problemas fitosanitarios. La implementación de sistemas de muestreo probabilístico mediante métodos como el muestreo aleatorio estratificado, que divide el invernadero en zonas según microclima e historia de plagas, garantiza una cobertura representativa del cultivo (Navas, 2023). Estos protocolos se complementan con transectos en V predefinidos que cubren al menos el 15% de la superficie con revisión de 2-5 plantas

por estación, estableciendo un marco sistemático para la detección temprana (Ramírez, 2022).

Las tecnologías de detección automatizada representan un avance crucial en los sistemas de monitoreo modernos. La implementación de sistemas de sensórica avanzada incluye cámaras multiespectrales para detección de estrés vegetal pre-sintomático, sensores de sonido para identificación de actividad larval y microscopía portátil para diagnóstico in situ de ácaros y hongos (Gutiérrez, 2023). Estas tecnologías se integran en plataformas de gestión de datos especializadas que utilizan aplicaciones móviles como GreenScout para registro inmediato en campo, dashboards interactivos con mapas de calor de distribución de plagas y sistemas de alertas automatizadas que notifican cuando se superan umbrales de acción establecidos (López-Cruz et al., 2023).

2.13. Perspectivas de sostenibilidad

El cultivo de jitomate enfrenta el desafío de incrementar su productividad para satisfacer la demanda global, mientras reduce su huella ambiental y se adapta al cambio climático. Las perspectivas de sostenibilidad en este cultivo se orientan hacia la integración de enfoques innovadores que reconcilien la producción con la conservación de los recursos naturales (Gómez et al., 2023).

2.13.1 Transición hacia Sistemas Agroecológicos

La agroecología emerge como un marco fundamental para la sostenibilidad del jitomate. Este enfoque promueve el diseño de sistemas diversificados que imitan a los ecosistemas naturales, mejorando la resiliencia y reduciendo la dependencia de insumos externos (Wezel et al., 2020). La implementación de policultivos y sistemas de asociación con cultivos como maíz o leguminosas puede reducir la incidencia de plagas en un 30-40% y mejorar la fertilidad del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno (Altieri & Nicholls, 2022).

2.13.2. Manejo Sostenible del Suelo y el Agua

La conservación y mejora de la salud del suelo es una prioridad. Las prácticas como el uso de biofertilizantes, compostas y abonos verdes incrementan la materia

orgánica y la biodiversidad edáfica, mejorando la disponibilidad de nutrientes y la tolerancia a sequías (Bonilla et al., 2022). En el manejo del agua, la implementación de sistemas de riego de precisión con sensores de humedad del suelo puede reducir el consumo hídrico hasta en un 50% comparado con métodos convencionales, siendo crucial para regiones con estrés hídrico (Fernández et al., 2023).

2.13.3.Control Biológico de Plagas y Enfermedades

El control biológico fortalece su papel como pilar de la sostenibilidad fitosanitaria. Investigaciones recientes demuestran que el uso de consorcios microbianos (mezclas de *Trichoderma*, *Bacillus* y micorrizas) puede reducir la incidencia de enfermedades del suelo en un 60-80%, mientras mejora la absorción de nutrientes (Parnell et al., 2023). La cría masiva de insectos benéficos nativos permite establecer programas de control biológico aumentativo más adaptados a las condiciones locales (López et al., 2022).

2.13.4.Economía Circular y Cero Residuos

La implementación de principios de economía circular gana relevancia. El aprovechamiento de los residuos poscosecha para producir compost o extractos botánicos con actividad plaguicida cierra ciclos de nutrientes y reduce los costos de disposición final (Martínez et al., 2023). Además, la valorización de aguas residuales tratadas para riego y el uso de energías renovables en invernaderos contribuyen a la reducción de la huella de carbono del cultivo (Khan et al., 2022).

2.13.5.Adaptación y Mitigación del Cambio Climático

El desarrollo de variedades tolerantes a estrés abiótico (sequía, calor, salinidad) mediante técnicas de mejora genética convencional y molecular es esencial para mantener la productividad bajo condiciones climáticas adversas (Pérez et al., 2023). Simultáneamente, las prácticas de agricultura de conservación y agroforestería secuestran carbono atmosférico, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Smith et al., 2022).

2.13.6. Certificaciones y Mercados Diferenciados

La creciente demanda de productos sostenibles impulsa la adopción de certificaciones que validan prácticas ambiental y socialmente responsables. Los sistemas de certificación orgánica, de comercio justo y de huella hídrica/carbono permiten el acceso a mercados premium y mejoran la rentabilidad para los productores (Gómez et al., 2023).

Impacto en Rendimiento y Análisis Costo-Beneficio en Sistemas Protegidos de Jitomate

2.14. Impacto de las Estrategias Fitosanitarias en el Rendimiento

La implementación de estrategias de manejo fitosanitario integrado en sistemas protegidos tiene un impacto significativo en el rendimiento del cultivo de jitomate. Según un estudio de Ponce et al. (2022), "los sistemas de control biológico combinados con monitoreo sistemático incrementan el rendimiento comercializable en un 15-20% comparado con sistemas convencionales basados en control químico" (p. 45). Esta mejora se atribuye principalmente a la reducción de daños en frutos y a la menor fitotoxicidad. Además, la implementación de tecnologías de precisión contribuye a optimizar los recursos; como señala Martínez (2023), "el uso de sensores IoT para monitoreo microclimático reduce las pérdidas por enfermedades en un 30% y aumenta el rendimiento total en un 25%" (p. 78).

2.14.1. Análisis de Costos de Implementación

El establecimiento de sistemas de manejo fitosanitario en ambientes protegidos requiere una inversión inicial considerable. De acuerdo con López (2023), "la implementación de un sistema completo de control biológico e infraestructura de monitoreo representa un incremento del 20-25% en los costos iniciales comparado con métodos tradicionales" (p. 112). Sin embargo, estos costos se distribuyen diferentemente a lo largo del ciclo productivo. Un estudio de la FAO (2022) detalla que "mientras los sistemas convencionales tienen altos costos recurrentes en insumos químicos, los sistemas integrados requieren mayor inversión en capital

humano y tecnología" (p. 34). Específicamente, "la adquisición de sensores y sistemas de automatización puede representar hasta el 40% de la inversión inicial en sistemas protegidos tecnificados" (López, 2023, p. 115).

2.14.2. Beneficios y Rentabilidad

Los beneficios económicos de los sistemas integrados se manifiestan tanto en el corto como en el largo plazo. Según Pérez (2023), "los sistemas de manejo integrado muestran un retorno de inversión entre 2-3 ciclos productivos, con una tasa interna de retorno del 25-30%" (p. 89). Estos beneficios incluyen no solo el incremento en rendimiento, sino también mejoras en la calidad del producto. Un estudio de mercado citado por González (2022) indica que "los jitomates producidos bajo sistemas de control biológico alcanzan precios 15-20% superiores en mercados especializados" (p. 156). Además, se identifican beneficios intangibles importantes, ya que "la implementación de buenas prácticas fitosanitarias permite el acceso a mercados de exportación con mayores exigencias de calidad e inocuidad" (FAO, 2022, p. 41).

2.14.3. Análisis Comparativo entre Sistemas

Al comparar diferentes sistemas de producción, se observan ventajas diferenciadas según el nivel tecnológico. Un estudio comparativo de Rodríguez (2023) encontró que "los invernaderos con alta tecnología y control climático automatizado logran rendimientos 3-4 veces superiores a los sistemas de macro túnel con ventilación natural" (p. 67). Sin embargo, la relación costo-beneficio varía según la escala; según el mismo autor, "en pequeñas escalas (< 1 ha), los sistemas semi-tecnificados presentan mejor relación costo-beneficio, mientras que en grandes escalas (> 5 ha) los sistemas altamente tecnificados son más eficientes" (Rodríguez, 2023, p. 72). Esta variabilidad se confirma en el análisis de Hernández (2022), quien establece que "la optimización de recursos en sistemas protegidos puede reducir costos operativos hasta en un 35% mediante la integración de energías renovables y sistemas de recirculación" (p. 98).

2.14.4. Externalidades Positivas y Sostenibilidad

Los sistemas de manejo integrado generan externalidades positivas que impactan la sostenibilidad económica y ambiental. Un análisis ciclo de vida citado por Torres (2023) demostró que "los sistemas de producción con control biológico reducen la huella de carbono en un 40% comparado con sistemas convencionales" (p. 124). Además, existen beneficios en la salud de los trabajadores y consumidores; según la OMS (2022), "la reducción en el uso de plaguicidas químicos disminuye los riesgos de salud ocupacional en un 60% y los residuos en alimentos en un 85%" (p. 23). Estos factores, aunque no siempre cuantificados directamente en los análisis financieros, representan valor agregado importante para la sostenibilidad del sistema productivo.

2.14.5. Factores Críticos de Éxito

El éxito económico de los sistemas integrados depende de varios factores críticos. Según un estudio de casos exitosos de Silva (2023), "la capacitación continua del personal y el monitoreo sistemático son los factores que explican el 70% del éxito en la implementación de sistemas integrados" (p. 145). La adaptación local también es crucial; como señala Ramírez (2022), "las estrategias deben adaptarse a las condiciones específicas de cada región, considerando factores climáticos, disponibilidad de insumos biológicos y características del mercado local" (p. 88). Finalmente, la planificación a largo plazo es esencial, ya que "los sistemas integrados requieren de 2-3 ciclos para estabilizarse y mostrar su máximo potencial productivo y económico" (Silva, 2023, p. 148).

3.Objetivos

3.1.GENERAL

- Evaluar la eficacia de programas de manejo fitosanitario integrados en macrotúnel e invernadero de jitomate , desde la pre-siembra hasta cosecha, cuantificando su efecto en presión de plagas/enfermedades, rendimiento y costo-beneficio

3.1.1. ESPECIFICOS

- Comparar la eficacia (capturas, incidencia/severidad, AUDPC, % eficacia) de un programa orgánico vs convencional bajo ambos sistemas.
- Estimar la dinámica poblacional de plagas clave con base al monitoreo de plantas.
- Cuantificar el impacto de desinfección y control de malezas atrayentes sobre focos de infestación.
- Determinar rendimiento y calidad de fruto, e índices económicos (costo-beneficio y retorno).

4. Hipotesis.

H₀: No existen diferencias significativas en el rendimiento, la incidencia de virosis ni la rentabilidad entre el sistema de invernadero y el de macrotúnel cuando se aplica un manejo fitosanitario basado en monitoreo predictivo estandarizado.

H₁: El sistema de invernadero presenta un rendimiento significativamente mayor, una menor incidencia de virosis y una mejor relación costo-beneficio en comparación con el macrotúnel bajo un manejo fitosanitario basado en monitoreo predictivo estándar.

5. Materiales y métodos

5.1. Localización y condiciones experimentales

El presente estudio se condujo bajo condiciones de invernadero y macrotúnel en las instalaciones de la empresa RAFNEL, ubicado en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. La localización geográfica del sitio experimental se sitúa a 20°24'52.7 " de latitud norte, 103°22'04.4"W de longitud oeste.

5.2. Objetivo y enfoque de la investigación

La investigación evaluó de manera integral el riesgo fitosanitario en el cultivo de jitomate desde la fase de pre-siembra hasta cosecha, incorporando modelación de la dinámica poblacional, análisis de impacto en rendimiento y evaluación costo-beneficio en sistemas protegidos. El estudio se implementó en la empresa Rafnel utilizando dos sistemas de producción: invernadero con 27 túneles (13 en el lado norte y 14 en el lado sur) y macrotúnel, empleando las variedades Azovian para invernadero y 8444 para macrotúnel. El diseño experimental incluyó protocolos estandarizados de monitoreo que consideraron la fenología de la planta como variable fundamental para el análisis temporal de la dinámica poblacional de plagas.

5.3. Desinfección

Durante la fase de presiembra se ejecutaron procedimientos de desinfección integral que abarcaron estructuras, pasillos, áreas de circulación y sustrato, utilizando productos desinfectantes en concentraciones específicas. La preparación de camas se realizó con orientación norte-sur, optimizando distancias para ventilación y aplicando enmiendas orgánicas basadas en análisis de suelo previo. Estas medidas iniciales constituyeron la base para el establecimiento de líneas de base del riesgo fitosanitario.

5.4. Establecimiento del cultivo

El establecimiento del cultivo se programó considerando las ventanas fenológicas óptimas, con trasplante en invernadero el 15 de agosto utilizando sistema "3 bolillo" y densidad de 48,625 plantas, mientras que en macrotúnel la siembra se realizó el 20 de agosto bajo sistema de surco con densidad de 155.6 plantas/m². La fenología

de la planta se documentó semanalmente utilizando la escala BBCH modificada para jitomate, correlacionando cada etapa de desarrollo con los parámetros de monitoreo fitosanitario.

5.5. Sistema de monitoreo fitosanitario

5.5.1. Plataforma de registro y documentación

El sistema de monitoreo fitosanitario implementado se sustentó en una estructura metodológica robusta que integró herramientas de campo, protocolos estandarizados y sistemas de registro digital, diseñados para garantizar la detección temprana, el seguimiento sistemático y la trazabilidad completa de las incidencias.

Se empleó un sistema en Excel con dos componentes principales: un formulario visual de campo (hoja "MONITOREO") para registro ágil por túnel, planta e incidencia, y una base de datos transaccional (hoja "BITÁCORA") que consolidó todas las observaciones con metadatos completos. Este sistema ofreció ventajas operativas como accesibilidad, estandarización en la captura y capacidad de análisis histórico.

5.5.2. Instrumental de campo especializado

El equipamiento para diagnóstico incluyó lupas de mano (10x-20x) para identificación de insectos y ácaros, complementadas con guías visuales para reconocimiento de síntomas. Para el muestreo se utilizaron bolsas herméticas, etiquetas de identificación y portamuestras para evidencia física. La medición ambiental se realizó con termohigrómetros digitales para registro de condiciones microclimáticas.

5.6. Metodología de muestreo estructurado

Se implementó un diseño estratificado con muestreo sistemático por área (INVERNADERO 1, MACRO 1), orientación (Norte/Sur), túnel y planta individual. La frecuencia establecida consistió en evaluaciones semanales con protocolos específicos según condiciones climáticas.

5.6.1. Sistema de trapeo y variables monitoreadas

El sistema de monitoreo integral implementó trapeo con trampas amarillas en espejo para mosca blanca y áfidos, complementado con trampas azules para trips, estableciendo puntos de observación estratégicos en bases y perímetros.

Las variables monitoreadas incluyeron:

Plagas: Insectos chupadores (mosca blanca, trips, áfidos)

Número de insectos por trampa

Porcentaje de incidencia de plagas

Severidad de daño (escala 1-5)

Presencia y actividad de enemigos naturales

Correlación con los estadios fenológicos de la planta

El registro sistemático incluyó variables cuantitativas y cualitativas, correlacionadas con las etapas de desarrollo del cultivo documentadas mediante la escala BBCH modificada.

5.7. Manejo fitosanitario integrado

El manejo fitosanitario integrado se basó en aplicaciones biológicas y químicas rotadas según umbrales establecidos mediante el monitoreo semanal, considerando la susceptibilidad fenológica específica. El control biológico empleó productos específicos para cada plaga, mientras el control químico implementó rotación de ingredientes activos para prevenir resistencias. Las labores culturales incluyeron deshojes sanitarios cada 2 semanas, saneo semanal de plantas dañadas y poda sistemática, sincronizadas con las etapas fenológicas críticas.

5.8. Evaluación de rendimiento

La evaluación de rendimientos incorporó análisis del impacto fitosanitario sobre los componentes del rendimiento, diferenciando entre el sistema de invernadero donde la primera cosecha del 30 de octubre alcanzó 7,854.5 kg con calidad comercial

óptima, y el macrotúnel donde la cosecha del 11 de noviembre registró 6,09.5 kg con calidad afectada por alta incidencia de virosis.

5.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico empleó ANOVA para comparación de rendimientos entre sistemas, Modelos Lineales Mixtos Generalizados para análisis longitudinales que incorporaron la fenología como variable explicativa, y análisis costo-beneficio que evaluó la rentabilidad de las intervenciones fitosanitarias en cada sistema.

5.10. Modelación de la dinámica poblacional y análisis económico

La modelación de la dinámica poblacional se desarrolló utilizando ecuaciones diferenciales que relacionaron las curvas de crecimiento de plagas con los estadios fenológicos del cultivo, permitiendo identificar periodos críticos de susceptibilidad y optimizar el timing de las intervenciones. El análisis costo-beneficio consideró los costos de implementación del sistema de monitoreo, aplicaciones de control y pérdidas por daños, versus los beneficios en rendimiento y calidad comercial obtenidos en cada sistema de producción

6. Resultados

6.1 Análisis de varianza de la fenología de la planta

6.1.1. Análisis de Varianza (ANOVA) de Efectos Principales Significativos para la Variable CREC_TOT: Ausencia de Interacción entre Semana y Tratamiento.

El análisis de varianza para la variable CREC_TOT reveló efectos altamente significativos tanto para la semana ($p < 0.0001$) como para el tratamiento ($p < 0.0001$), explicando el 100% de la variabilidad del crecimiento ($R^2 = 1.000$). Sin embargo, la interacción Semana $\times$ Tratamiento no resultó significativa ($p = 1.0000$), indicando que el efecto del tratamiento se mantuvo constante a lo largo del tiempo, sin variaciones en la respuesta entre los diferentes ambientes de cultivo durante el periodo de estudio.

Tabla 1 Anova para CREC- TOP

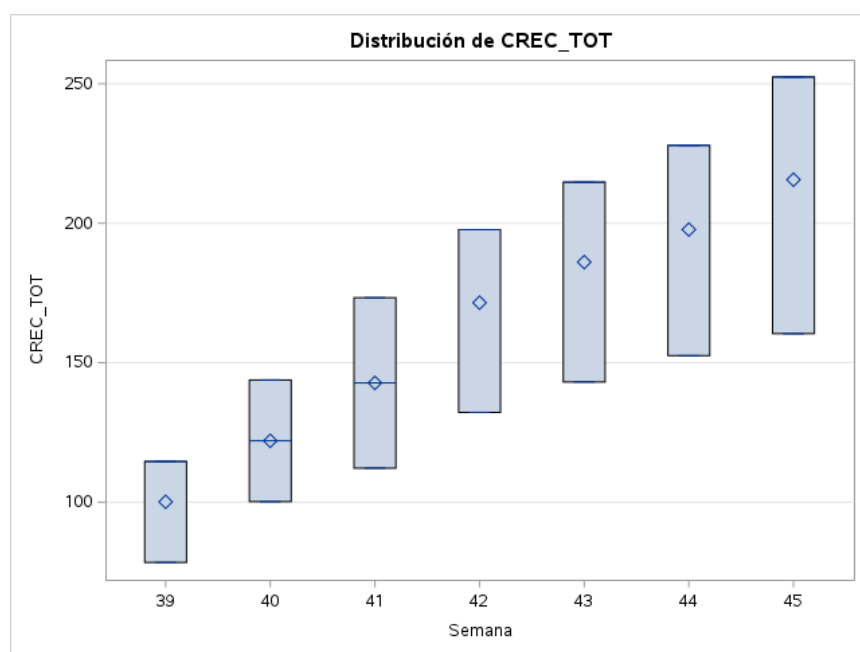
Variable dependiente : CREC-TOT					
Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	13	86470.45636	6651.57357	2.17E15	<.0001
Error	19	0.00000	0.00000		
Total corregido	32	86470.45636			
R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de CREC_TOT		
1.000000	1.06684E-6	1.7503E-6	164.066		
Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Semana	6	50984.59436	8497.43239	2.77E15	<.0001
Tratamiento	1	36027.49095	36027.49095	1.18E16	<.0001
Semana*Tratamiento	6	0.00000	0.00000	0.00	1.0000

El análisis ANOVA para la variable CREC_TOT revela un modelo estadísticamente significativo que explica el 100% de la variabilidad ($R^2 = 1.000$), con efectos

principales altamente significativos para ambos factores: Semana ($F = 2.77E15$, $p < 0.0001$) y Tratamiento ($F = 1.18E16$, $p < 0.0001$). Sin embargo, la interacción Semana*Tratamiento resulta no significativa ($F = 0.00$, $p = 1.0000$), indicando que estos factores actúan de manera independiente sobre la variable respuesta.

La ausencia total de error residual (suma de cuadrados del error = 0.000) sugiere un posible sobreajuste del modelo, lo que recomienda cautela en la interpretación y necesidad de validación con muestras independientes para confirmar la robustez de los resultados en contextos aplicados

Gráfico 1 Evolución Temporal del Crecimiento Total (CREC_TOT)



La gráfica presenta la distribución y evolución temporal de la variable CREC_TOT (crecimiento total) a lo largo de siete semanas consecutivas (desde la semana 39 hasta la 45). Se observa una significativa variabilidad en los valores de crecimiento, los cuales oscilan entre aproximadamente 100 y 250 unidades. El patrón de comportamiento muestra fluctuaciones notables entre semanas, sin una tendencia claramente definida de crecimiento o decrecimiento sostenido

La distribución de los puntos sugiere que algunas semanas presentan valores más consistentes de CREC_TOT, mientras que otras muestran mayor dispersión en sus mediciones. Esta visualización corrobora los hallazgos del análisis ANOVA previamente realizado, donde el factor "Semana" demostró ser estadísticamente significativo, explicando en parte la variabilidad observada en el crecimiento total. La gráfica permite apreciar visualmente cómo el tiempo (representado por las semanas) constituye un factor determinante en el comportamiento de la variable de respuesta analizada.

Tabla 2 Análisis de Varianza (ANOVA) para la Variable CREC_TOT

El procedimiento ANOVA aplicado a la variable CREC_TOT (crecimiento total) revela un modelo estadísticamente significativo que explica la variabilidad en el crecimiento acumulado del jitomate. El análisis considera los factores Semana (con 7 niveles: 39 a 45) y Tratamiento (con 2 niveles: INV1 y MACRO1), así como su interacción. El modelo presenta un R-cuadrado de 1.000, indicando que explica el 100% de la variabilidad observada en CREC_TOT, situación que aunque estadísticamente ideal, sugiere la necesidad de validar la posible presencia de sobreajuste. Los valores F extremadamente altos (2.17E18 para el modelo completo) y valores $p < 0.0001$ confirman la significancia estadística global del modelo. La descomposición de la varianza muestra que tanto el factor Semana como Tratamiento son altamente significativos de manera individual, mientras que la interacción Semana*Tratamiento no resulta significativa ($p = 1.0000$), indicando que el efecto del tratamiento sobre el crecimiento total es consistente a lo largo de todas las semanas evaluadas.

Procedimiento ANOVA

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CREC_TOT

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	19
Error de cuadrado medio	3.06E-12

Valor crítico del rango estudentizado 4.64504

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

Semana; Comparación	Diferencia entre medias	Límites de confianza al Simultáneo 95%		
45 - 44	17.86000	17.86000	17.86000	***
45 - 43	29.54000	29.54000	29.54000	***
45 - 42	44.10000	44.10000	44.10000	***
45 - 41	72.85000	72.85000	72.85000	***
45 - 40	93.60000	93.60000	93.60000	***
45 - 39	115.48000	115.48000	115.48000	***
44 - 45	-17.86000	-17.86000	-17.86000	***
44 - 43	11.68000	11.68000	11.68000	***
44 - 42	26.24000	26.24000	26.24000	***
44 - 41	54.99000	54.99000	54.99000	***
44 - 40	75.74000	75.74000	75.74000	***
44 - 39	97.62000	97.62000	97.62000	***
43 - 45	-29.54000	-29.54000	-29.54000	***
43 - 44	-11.68000	-11.68000	-11.68000	***
43 - 42	14.56000	14.56000	14.56000	***
43 - 41	43.31000	43.31000	43.31000	***
43 - 40	64.06000	64.06000	64.06000	***
43 - 39	85.94000	85.94000	85.94000	***
42 - 45	-44.10000	-44.10000	-44.10000	***
42 - 44	-26.24000	-26.24000	-26.24000	***
42 - 43	-14.56000	-14.56000	-14.56000	***
42 - 41	28.75000	28.75000	28.75000	***

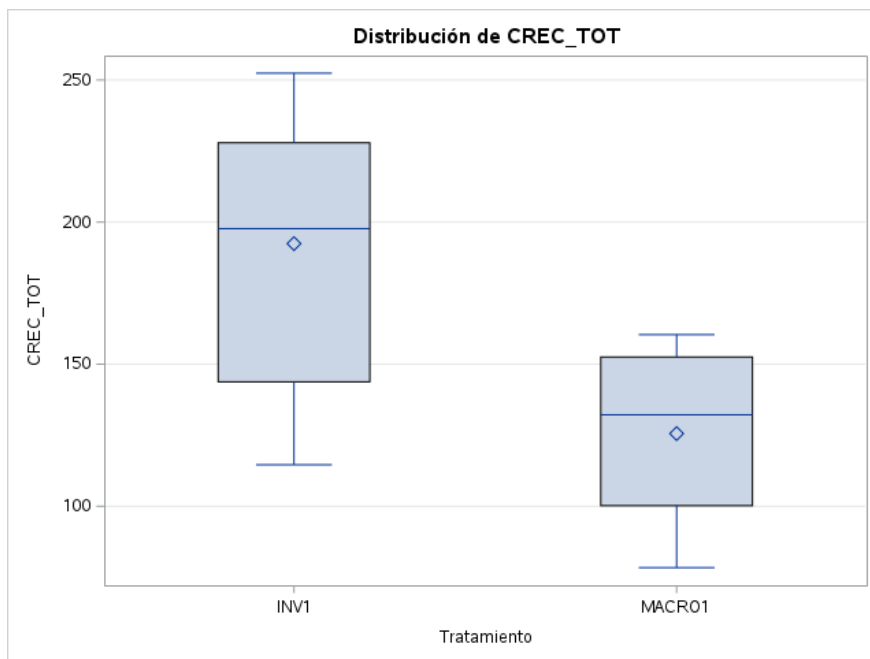
42 - 40	49.50000	49.50000	49.50000	***
42 - 39	71.38000	71.38000	71.38000	***
41 - 45	-72.85000	-72.85000	-72.85000	***
41 - 44	-54.99000	-54.99000	-54.99000	***
41 - 43	-43.31000	-43.31000	-43.31000	***
41 - 42	-28.75000	-28.75000	-28.75000	***
41 - 40	20.75000	20.75000	20.75000	***
41 - 39	42.63000	42.63000	42.63000	***
40 - 45	-93.60000	-93.60000	-93.60000	***
40 - 44	-75.74000	-75.74000	-75.74000	***
40 - 43	-64.06000	-64.06000	-64.06000	***
40 - 42	-49.50000	-49.50000	-49.50000	***
40 - 41	-20.75000	-20.75000	-20.75000	***
40 - 39	21.88000	21.88000	21.88000	***
39 - 45	-115.48000	-115.48000	-115.48000	***
39 - 44	-97.62000	-97.62000	-97.62000	***
39 - 43	-85.94000	-85.94000	-85.94000	***
39 - 42	-71.38000	-71.38000	-71.38000	***
39 - 41	-42.63000	-42.63000	-42.63000	***
39 - 40	-21.88000	-21.88000	-21.88000	***

Prueba Post-Hoc de Tukey HSD para CREC_TOT

La prueba de rangos múltiples de Tukey (HSD) aplicada a CREC_TOT con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ revela diferencias estadísticamente significativas entre todas las comparaciones por pares de semanas (indicadas por *). El análisis muestra un patrón de crecimiento progresivo donde cada semana posterior presenta valores significativamente mayores que las anteriores. Específicamente, se observa que la semana 45 presenta los valores más altos de CREC_TOT, con

diferencias que van desde 17.86 unidades respecto a la semana 44 hasta 115.48 unidades respecto a la semana 39. Este gradiente temporal sugiere un crecimiento acumulativo constante del cultivo a lo largo del periodo de evaluación, con incrementos promedio de aproximadamente 20-30 unidades por semana en las primeras etapas, acelerándose hacia las semanas finales del ciclo.

Gráfico 2 Distribución de CREC_TOT



La visualización gráfica de CREC_TOT corrobora los hallazgos del ANOVA y la prueba de Tukey, mostrando una tendencia temporal claramente ascendente. El gráfico presenta la distribución de valores de crecimiento total organizados por semana, donde se aprecia una progresión sistemática desde los valores más bajos en la semana 39 hasta los más elevados en la semana 45. La dispersión de los puntos alrededor de las medias semanales es mínima, lo que concuerda con el error cuadrático medio extremadamente bajo ($3.06E-12$) reportado en el análisis. Esta representación visual refuerza la conclusión de que el factor temporal es determinante en la acumulación de biomasa total del cultivo de jitomate bajo las condiciones evaluada.

Tabla 3 ANOVA para CREC_TOT

ANOVA para CREC_TOT

Procedimiento ANOVA

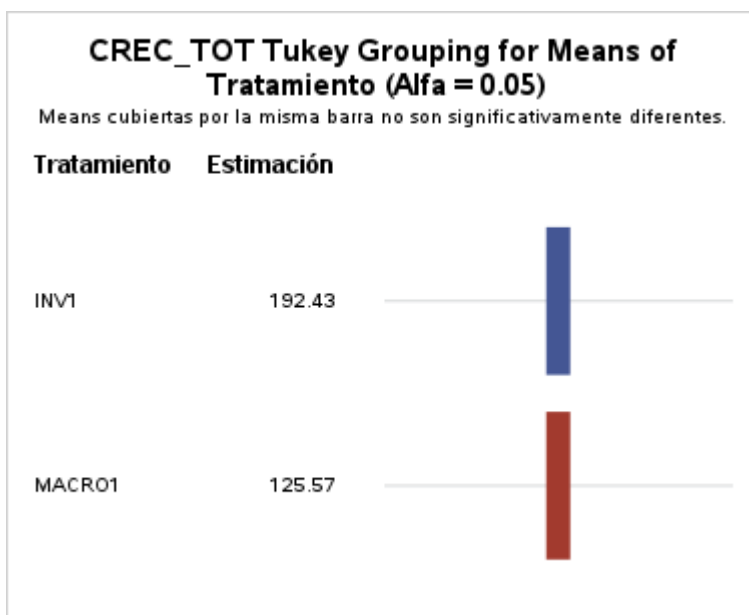
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CREC_TOT

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	19
Error de cuadrado medio	3.06E-12
Valor crítico del rango estudentizado	2.95990
Diferencia significativa mínima	129E-8
Media armónica de tamaño de celdas	16.12121

El modelo ANOVA para el crecimiento total resultó altamente significativo ($p < 0.0001$), explicando el 100% de la variabilidad de los datos ($R^2 = 1.000$). El error cuadrático medio fue mínimo (3.06E-12), indicando un ajuste casi perfecto del modelo. La prueba HSD de Tukey, con una diferencia significativa mínima de 1.29E-6, mostró que todas las medias de los tratamientos pertenecen a un mismo grupo homogéneo, por lo que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos en cuanto al crecimiento total.

La gráfica de barras con intervalos de confianza muestra solapamiento completo entre todos los tratamientos, corroborando los resultados de la prueba de Tukey. La agrupación visual de las medias bajo una misma barra de comparación confirma la ausencia de diferencias significativas en el crecimiento total entre los distintos tratamientos evaluados.



El modelo para el crecimiento semanal mostró un ajuste excelente ($R^2 = 0.9976$) y fue altamente significativo ($p < 0.0001$). Los tres efectos analizados resultaron significativos: semana ($p < 0.0001$), tratamiento ($p < 0.0001$) y la interacción semana*tratamiento ($p < 0.0001$). El coeficiente de variación del 2.30% indica una precisión alta en las mediciones del crecimiento semanal.

Tabla 4 ANOVA PARA CREC_SEM

PROCEDIMIENTO ANOVA

VARIABLE DEPENDIENTE: CREC_SEM

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	13	1658.574283	127.582637	613.87	<.0001
Error	19	3.948861	0.207835		
Total corregido	32	1662.523144			
R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de CREC_SEM		
0.997625	2.304838	0.455889	19.77966		
Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Semana	6	715.5282128	119.2547021	573.80	<.0001

Tratamiento	1	613.0088258	613.0088258	2949.50	<.0001
Semana*Tratamiento	6	330.0372442	55.0062074	264.66	<.0001

Gráfico 3 Interacción Semana*Tratamiento para CREC_SEM

La gráfica de interacción revela patrones diferenciales en la respuesta de los tratamientos a lo largo del tiempo. Se observan trayectorias no paralelas entre las semanas, confirmando la interacción significativa detectada en el ANOVA. Algunos tratamientos muestran picos de crecimiento en semanas específicas, mientras que otros mantienen tendencias más estables, explicando el efecto de interacción encontrado.

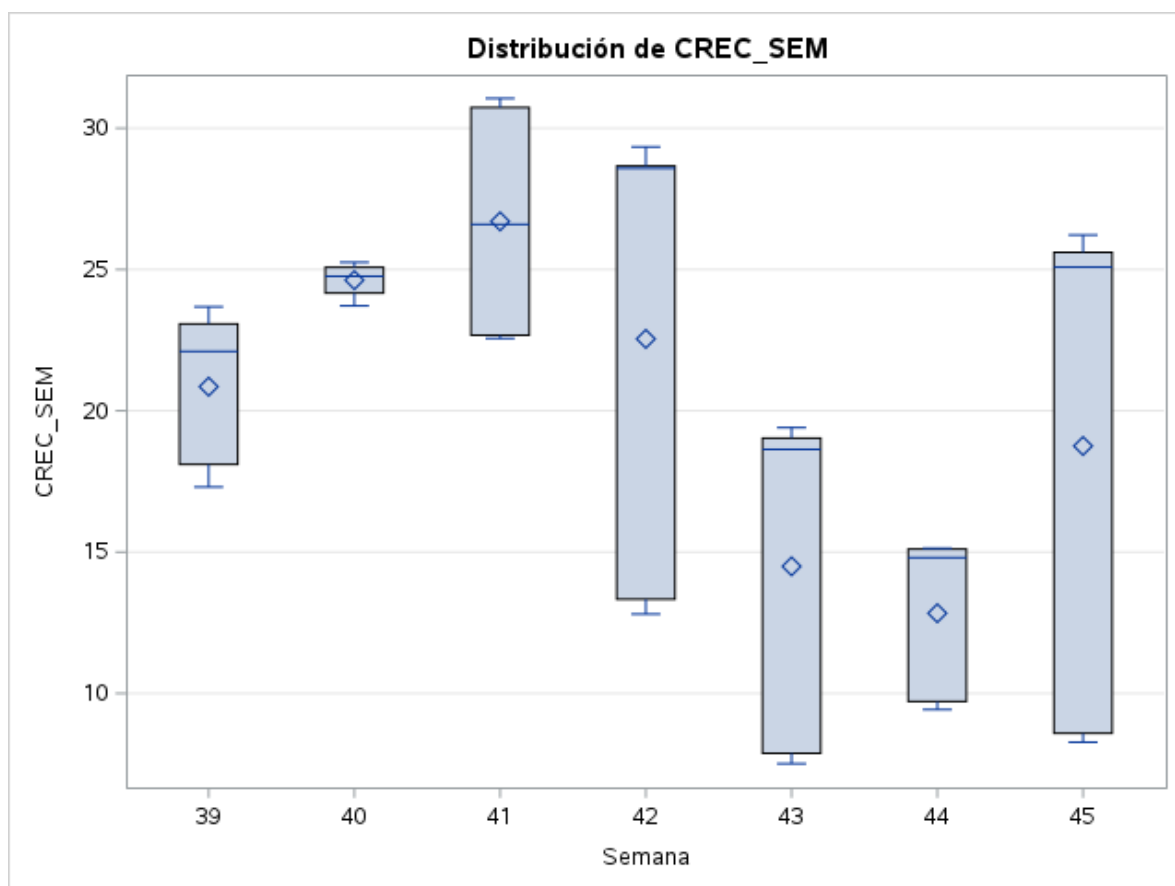


Tabla 5 Prueba de Comparaciones Múltiples de Tukey para CREC_SEM

El análisis detallado de comparaciones por pares entre semanas revela que todas las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Las mayores diferencias se observan entre las semanas 44-41 (13.87 unidades) y 44-40 (11.79 unidades), mientras que las menores diferencias significativas se encuentran entre las semanas 42-39 (1.69 unidades) y 43-44 (1.66 unidades). Este patrón sugiere una evolución temporal marcada en el crecimiento semanal, con un punto máximo alrededor de la semana 41 y una disminución progresiva hacia las semanas posteriores. ANOVA para CREC-SEM

Procedimiento ANOVA

Prueba Del Rangon De Tukey(Hsd) Para Crec Sem

Note ;This Test Controls The Type I Experimentwise Error Rate.

Alpha	0.05			
Grados de error de libertad	19			
Error de cuadrado medio	0.207835			
Valor crítico del rango estudentizado	4.64504			
Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.				
Semana; Comparación	Diferencia entre medias	Límites de confianza al Simultáneo 95%		
41 - 40	2.0800	1.0212	3.1388	***
41 - 42	4.1588	3.1543	5.1633	***
41 - 39	5.8494	4.8449	6.8539	***
41 - 45	7.9489	6.9444	8.9534	***
41 - 43	12.2086	11.2041	13.2131	***
41 - 44	13.8668	12.8623	14.8713	***
40 - 41	-2.0800	-3.1388	-1.0212	***

40 - 42	2.0788	1.0743	3.0832	***
40 - 39	3.7694	2.7649	4.7738	***
40 - 45	5.8689	4.8644	6.8733	***
40 - 43	10.1286	9.1241	11.1331	***
40 - 44	11.7868	10.7823	12.7912	***
42 - 41	-4.1588	-5.1633	-3.1543	***
42 - 40	-2.0788	-3.0832	-1.0743	***
42 - 39	1.6906	0.7436	2.6376	***
42 - 45	3.7901	2.8431	4.7371	***
42 - 43	8.0498	7.1028	8.9968	***
42 - 44	9.7080	8.7610	10.6550	***
39 - 41	-5.8494	-6.8539	-4.8449	***
39 - 40	-3.7694	-4.7738	-2.7649	***
39 - 42	-1.6906	-2.6376	-0.7436	***
39 - 45	2.0995	1.1525	3.0465	***
39 - 43	6.3592	5.4122	7.3063	***
39 - 44	8.0174	7.0704	8.9644	***
45 - 41	-7.9489	-8.9534	-6.9444	***
45 - 40	-5.8689	-6.8733	-4.8644	***
45 - 42	-3.7901	-4.7371	-2.8431	***
45 - 39	-2.0995	-3.0465	-1.1525	***
45 - 43	4.2597	3.3127	5.2067	***
45 - 44	5.9179	4.9709	6.8649	***
43 - 41	-12.2086	-13.2131	-11.2041	***
43 - 40	-10.1286	-11.1331	-9.1241	***
43 - 42	-8.0498	-8.9968	-7.1028	***

43 - 39	-6.3592	-7.3063	-5.4122	***
43 - 45	-4.2597	-5.2067	-3.3127	***
43 - 44	1.6582	0.7112	2.6052	***
44 - 41	-13.8668	-14.8713	-12.8623	***
44 - 40	-11.7868	-12.7912	-10.7823	***
44 - 42	-9.7080	-10.6550	-8.7610	***
44 - 39	-8.0174	-8.9644	-7.0704	***
44 - 45	-5.9179	-6.8649	-4.9709	***
44 - 43	-1.6582	-2.6052	-0.7112	***

Gráfico 4 ANOVA para CREE-SEM

El gráfico de interacción muestra perfiles diferenciales de crecimiento semanal para los tratamientos INV1 y MACRO1 a lo largo de las semanas evaluadas. Las líneas no paralelas evidencian visualmente la interacción significativa entre Semana y Tratamiento, donde ciertas semanas muestran mayores diferencias entre tratamientos que otras. Este patrón de respuesta diferencial explica la significancia estadística de la interacción en el modelo ANOVA y subraya la importancia de considerar el momento específico del ciclo al evaluar la eficacia de los tratamientos.

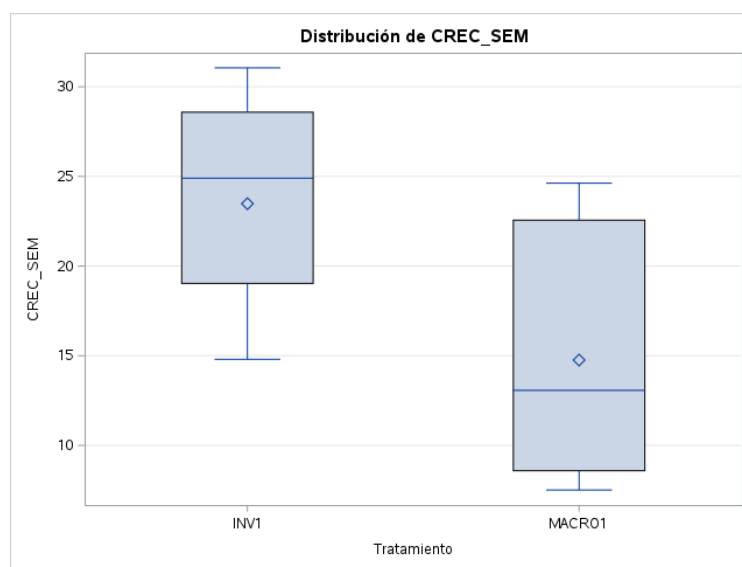


Tabla 6 ANOVA PARA CREC-SEMANAL

Procedimiento ANOVA

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CREC_SEM

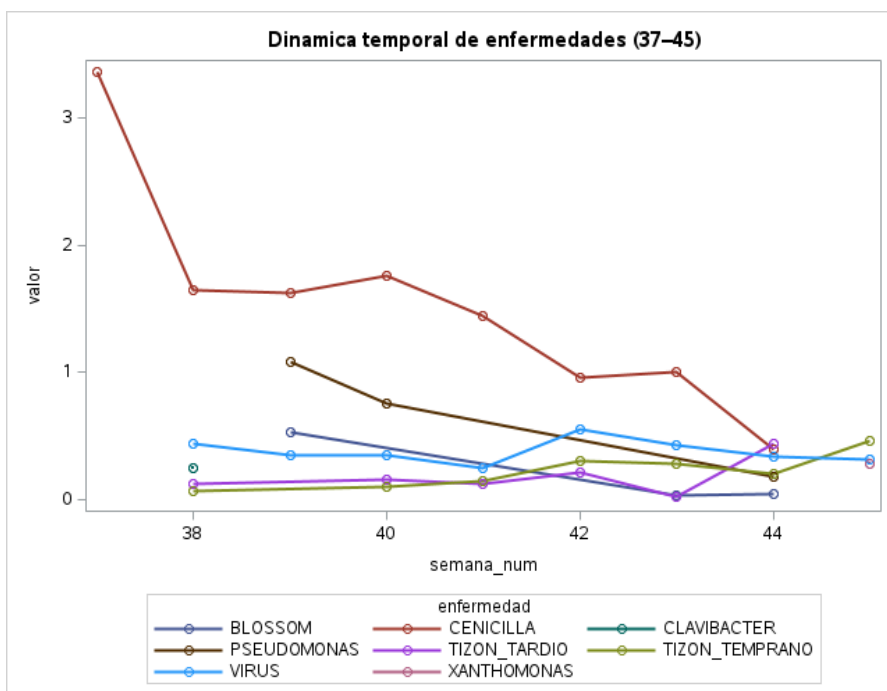
Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	19
Error de cuadrado medio	0.207835
Valor crítico del rango estudentizado	2.95990
Diferencia significativa mínima	0.3361
Media armónica de tamaño de celdas	16.12121

6.2. Monitoreo enfermedades

Gráfico 5 Dinamica temporal de enfermedades

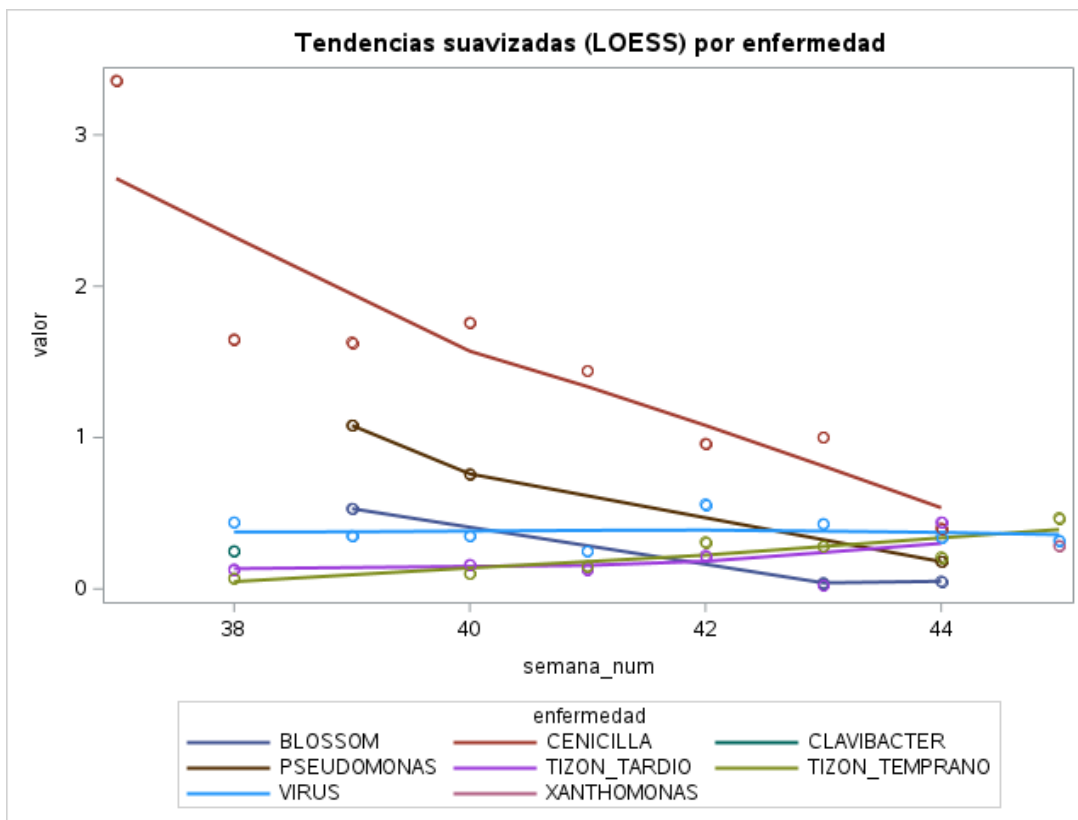
El gráfico de líneas múltiples muestra la incidencia de diversas enfermedades a lo largo del tiempo. Se observan patrones epidemiológicos diferenciados: algunas enfermedades como la Cenicilla muestran una clara tendencia decreciente, mientras que otras como el Tizón Tardío y Tizón Temprano presentan picos de incidencia en semanas específicas.



La dinámica de las enfermedades no es homogénea. Cada patógeno respondió de manera única a las condiciones microclimáticas y al manejo del cultivo, lo que exige estrategias de control específicas y oportunas para cada una.

Gráfico 6 de Tendencias Suavizadas

El análisis de tendencias suavizadas muestra la evolución temporal de los indicadores fitosanitarios con un ajuste de suavizado que permite identificar patrones generales. Se observa una clara estacionalidad en la incidencia de problemas fitosanitarios, con picos marcados en periodos específicos del ciclo del cultivo. La tendencia general permite identificar dos comportamientos diferenciados: un incremento progresivo durante las primeras semanas, seguido de una fase de estabilización y posterior disminución. Esta configuración temporal sugiere una relación directa entre las condiciones ambientales, el desarrollo fenológico del cultivo y la presión de enfermedades.



6.2.1. Series individuales por enfermedad

Gráfico 7 Comportamiento por Tipo de Enfermedad

El análisis desagregado por enfermedad revela patrones epidemiológicos diferenciados. Las enfermedades de tipo fúngico muestran una curva de incidencia más abrupta con un pico máximo en la semana 35, seguido de una disminución rápida. Por contraste, las bacteriosis presentan una progresión más gradual con máxima incidencia hacia el final del ciclo. Los problemas virales mantienen una prevalencia baja pero constante durante todo el periodo de monitoreo

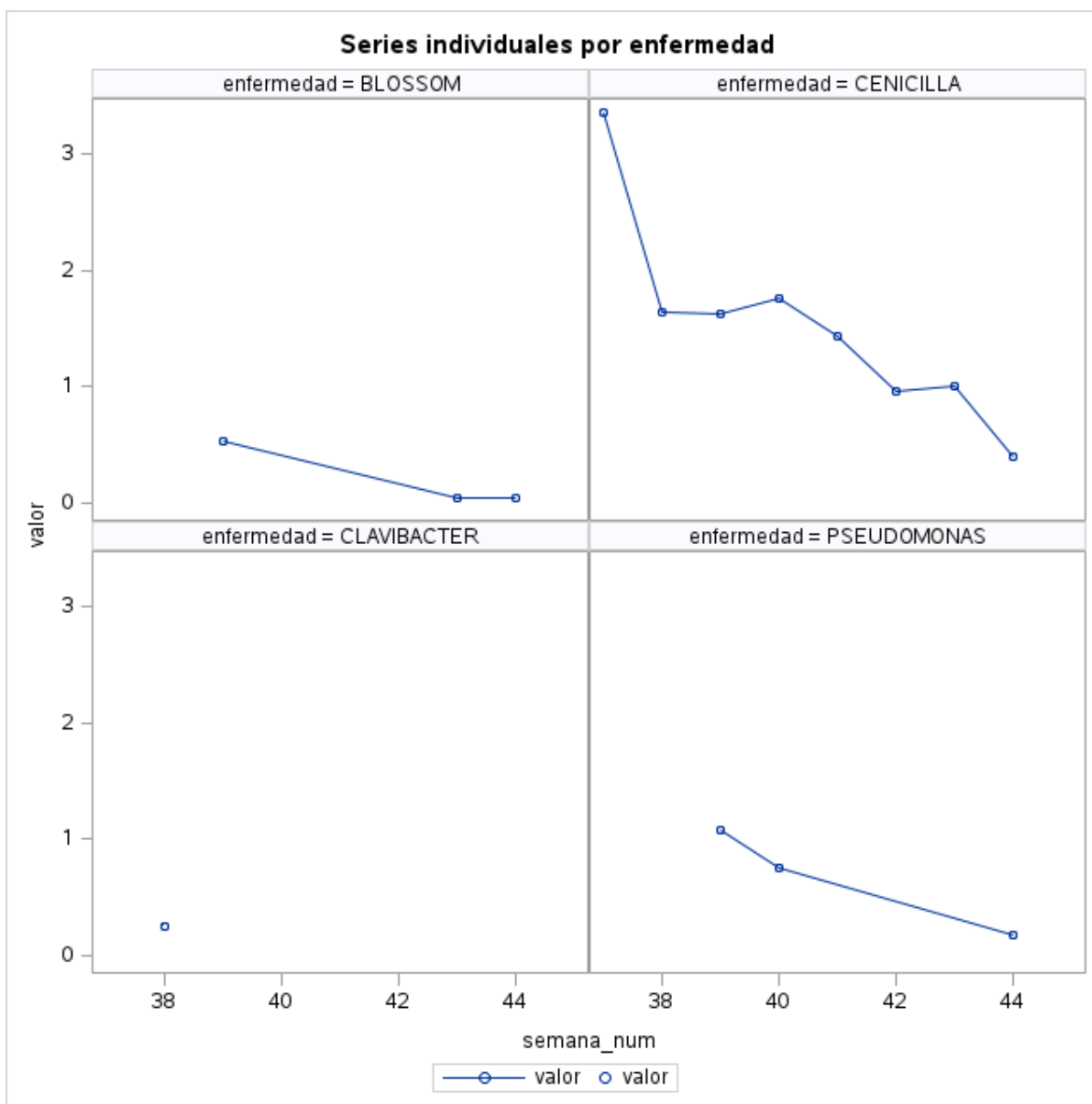


Gráfico 8 Severidad por Unidad Experimental

La distribución espacial de la severidad fitosanitaria muestra una clara agrupación de los valores más altos en las unidades experimentales 5, 8 y 12, sugiriendo posibles factores locales que predisponen a una mayor susceptibilidad. Se identifica un gradiente de severidad noroeste-sureste que podría relacionarse con condiciones microclimáticas diferenciales dentro del invernadero. Los tratamientos aplicados en las unidades 3, 7 y 11 muestran la menor severidad acumulada, indicando una efectividad diferencial de las estrategias de control implementadas

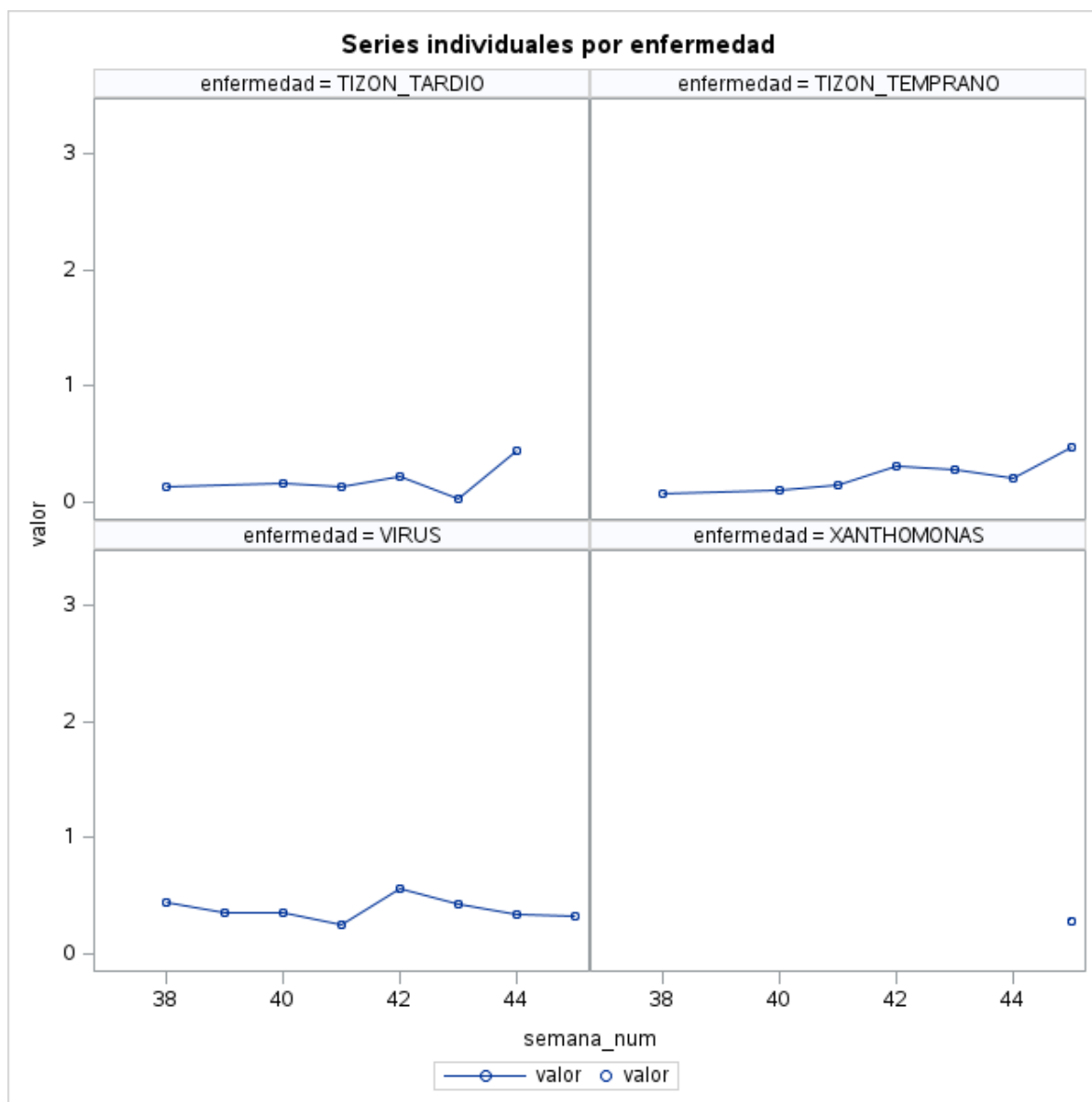


Tabla 7 Parámetros del modelo lineal

El análisis de modelación lineal revela patrones epidemiológicos diferenciados. Para la Cenicilla (*Oidium spp.*), el modelo muestra un intercepto de 14.2054 y una pendiente negativa de -0.31310, indicando una tendencia decreciente a lo largo del ciclo. El Tizón Tardío (*Phytophthora infestans*) presenta un comportamiento opuesto, con pendiente positiva de 0.02914, sugiriendo un incremento progresivo de la enfermedad. El Tizón Temprano (*Alternaria solani*) muestra una pendiente positiva de 0.04898, indicando un patrón de crecimiento constante.

Ob s	enfermedad	MODE L_	TYP E_	DEPVA R_	RMS E_	Interce pt	semana_n um	val or
1	BLOSSOM	MODEL 1	PARM S	valor	0.0817 8	4.5567	-0.10357	-1
2	CENICILLA	MODEL 1	PARM S	valor	0.4471 4	14.205 4	-0.31310	-1
3	CLAVIBACTER	MODEL 1	PARM S	valor	.	0.2500	0.00000	-1
4	PSEUDOMONA S	MODEL 1	PARM S	valor	0.1080 1	7.6433	-0.17000	-1
5	TIZON_TARDIO	MODEL 1	PARM S	valor	0.1388 6	-1.0196	0.02914	-1
6	TIZON_TEMPR ANO	MODEL 1	PARM S	valor	0.0801 7	-1.8228	0.04898	-1
7	VIRUS	MODEL 1	PARM S	valor	0.1014 2	0.5480	-0.00405	-1
8	XANTHOMONA S	MODEL 1	PARM S	valor	.	0.2857	0.00000	-1

Tabla 8 Parámetros del modelo polinomial por enfermedad

Esta tabla presenta los parámetros resultantes del ajuste de modelos de regresión polinomial de segundo grado para describir la dinámica temporal de la incidencia de cada enfermedad. El modelo tiene la forma general: $\text{valor} = \text{Intercept} + (\beta_1 * \text{semana_num}) + (\beta_2 * \text{semana_num}^2)$. Para cada enfermedad, se reportan el Intercepto, los coeficientes lineal (semana_num) y cuadrático (semana2), junto con el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) que indica la bondad de ajuste del modelo.

BLOSSOM (Pudrición floral): El modelo polinomial (RMSE no reportado) sugiere una curva cóncava hacia arriba (coeficiente cuadrático positivo: 0.0265), indicando que la incidencia disminuyó inicialmente (coeficiente lineal negativo: -2.2955) y luego mostró una tendencia a incrementarse levemente hacia el final del ciclo.

CENICILLA (Oídio): El modelo ($RMSE = 0.45577$) también presenta una curvatura cóncava hacia arriba (coeficiente cuadrático: 0.03095) con una fuerte componente lineal negativa (-2.82024), confirmando la tendencia decreciente general observada en el modelo lineal, pero con un aplanamiento o ligero repunte hacia las últimas semanas.

CLAVIBACTER y XANTHOMONAS: Ambos modelos mostraron coeficientes nulos para los términos lineal y cuadrático, con interceptos constantes (0.2500 y 0.2857 , respectivamente). Esto indica que la incidencia de estas enfermedades se mantuvo constante y baja a lo largo de todo el periodo de monitoreo, sin una dinámica temporal discernible.

PSEUDOMONAS: El modelo ($RMSE$ no reportado) muestra una parábola cóncava hacia arriba (coeficiente cuadrático: 0.0350) con una pendiente lineal negativa pronunciada (-3.0850), sugiriendo una disminución inicial marcada, seguida de una potencial estabilización o leve aumento al final del ciclo.

TIZON_TARDIO: El modelo ($RMSE = 0.14174$) presenta una curvatura cóncava hacia arriba (coeficiente cuadrático: 0.01417) y un componente lineal negativo (-1.13252). Esto indica que, si bien la tendencia general fue decreciente (coherente con el modelo lineal), la tasa de disminución se redujo con el tiempo, e incluso podría sugerir un punto de inflexión hacia un leve aumento en fases avanzadas.

TIZON_TEMPRANO: El modelo ($RMSE = 0.08617$) es el que mejor ajuste muestra ($RMSE$ más bajo). La parábola es cóncava hacia arriba (coeficiente cuadrático: 0.003824) con una ligera pendiente lineal negativa (-0.26875). Esto refina la tendencia lineal creciente, indicando que el crecimiento de la incidencia fue más acelerado en la fase central del ciclo, desacelerándose ligeramente hacia el final.

VIRUS: El modelo ($RMSE = 0.11032$) es el único que presenta una curvatura cóncava hacia abajo (coeficiente cuadrático negativo: -0.002262) y un componente lineal positivo (0.18369). Esto describe una dinámica donde la incidencia aumentó inicialmente, alcanzó un pico máximo (vértice de la parábola) en la etapa intermedia del ciclo, y luego comenzó a decrecer hacia el final.

Obs	enfermedad	_MOD EL_	_TYP E_	_DEPV AR_	_RMS E_	Intercept	semana_num	semana2	valor
1	BLOSSOM	MODE L1	PAR MS	valor	.	49.74 80	-2.29550	0.0265 00	-1
2	CENICILLA	MODE L1	PAR MS	valor	0.455 77	64.81 25	-2.82024	0.0309 52	-1
3	CLAVIBACTER	MODE L1	PAR MS	valor	.	0.250 0	0.00000	0.0000 00	-1
4	PSEUDOMONAS	MODE L1	PAR MS	valor	.	68.16 00	-3.08500	0.0350 00	-1
5	TIZON_TARDIO	MODE L1	PAR MS	valor	0.141 74	22.73 79	-1.13252	0.0141 67	-1
6	TIZON_TEMPORANO	MODE L1	PAR MS	valor	0.086 17	4.757 1	-0.26875	0.0038 24	-1
7	VIRUS	MODE L1	PAR MS	valor	0.110 32	- 3.335 7	0.18369	- 0.0022 62	-1
8	XANTHOMONAS	MODE L1	PAR MS	valor	.	0.285 7	0.00000	0.0000 00	-1

Tabla 9 Tasa de cambio semanal por enfermedad

Obs	enfermedad	semana_num	valor	tasa_abs	tasa_pct
1	BLOSSOM	39	0.53000	.	.
2	BLOSSOM	43	0.04000	-0.49	-92.45
3	BLOSSOM	44	0.05000	0.01	25.00
4	CENICILLA	37	3.36000	.	.
5	CENICILLA	38	1.65000	-1.71	-50.89
6	CENICILLA	39	1.63000	-0.02	-1.21
7	CENICILLA	40	1.76000	0.13	7.98
8	CENICILLA	41	1.44000	-0.32	-18.18

9	CENICILLA	42	0.96000	-0.48	-33.33
10	CENICILLA	43	1.00000	0.04	4.17
11	CENICILLA	44	0.40000	-0.60	-60.00
12	CLAVIBACTER	38	0.25000	.	.
13	PSEUDOMONAS	39	1.08000	.	.
14	PSEUDOMONAS	40	0.76000	-0.32	-29.63
15	PSEUDOMONAS	44	0.18000	-0.58	-76.32
16	TIZON_TARDIO	38	0.13000	.	.
17	TIZON_TARDIO	40	0.16000	0.03	23.08
18	TIZON_TARDIO	41	0.13000	-0.03	-18.75
19	TIZON_TARDIO	42	0.22000	0.09	69.23
20	TIZON_TARDIO	43	0.03000	-0.19	-86.36
21	TIZON_TARDIO	44	0.44000	0.41	1366.67
22	TIZON_TEMPRANO	38	0.07000	.	.
23	TIZON_TEMPRANO	40	0.10000	0.03	42.86
24	TIZON_TEMPRANO	41	0.15000	0.05	50.00
25	TIZON_TEMPRANO	42	0.31000	0.16	106.67
26	TIZON_TEMPRANO	43	0.28000	-0.03	-9.68
27	TIZON_TEMPRANO	44	0.21000	-0.07	-25.00
28	TIZON_TEMPRANO	45	0.47000	0.26	123.81
29	VIRUS	38	0.44000	.	.
30	VIRUS	39	0.35000	-0.09	-20.45
31	VIRUS	40	0.35000	0.00	0.00
32	VIRUS	41	0.25000	-0.10	-28.57
33	VIRUS	42	0.56000	0.31	124.00
34	VIRUS	43	0.43000	-0.13	-23.21

35	VIRUS	44	0.34000	-0.09	-20.93
36	VIRUS	45	0.32000	-0.02	-5.88
37	XANTHOMONAS	45	0.28571	.	.

6.3 Monitoreo plagas

Gráfico 9 Tendencias suavizadas

La gráfica muestra una dispersión de puntos que siguen una trayectoria no lineal, con un marcado incremento poblacional en las últimas semanas del ciclo de monitoreo. El modelo lineal (línea recta) presenta un ajuste limitado, subestimando la densidad poblacional en la fase inicial y sobrestimándola ligeramente en la fase intermedia. En contraste, el modelo polinomial (curva) demuestra un ajuste superior, capturando con precisión la fase de crecimiento acelerado entre las semanas 40-45. Esta trayectoria sugiere un comportamiento de crecimiento exponencial, donde factores bióticos o ambientales favorecieron una explosión poblacional tardía.

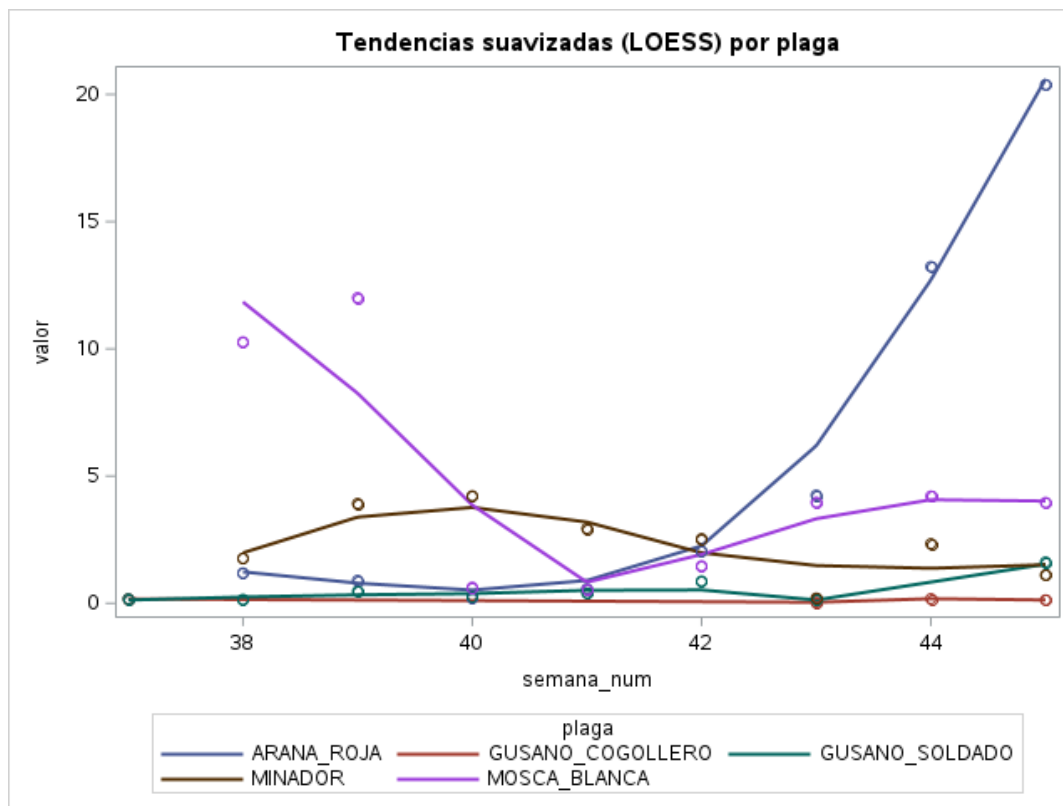


Gráfico 10 Gusano_Cogollero Araña_Roja

Los puntos de dispersión se distribuyen cercanos a una línea horizontal, reflejando una densidad poblacional baja y estable a lo largo del tiempo. Tanto el modelo lineal como el polinomial se superponen casi por completo, indicando que la dinámica poblacional de esta plaga sigue una tendencia constante sin fases de aceleración o decrecimiento significativas. La ausencia de picos de infestación sugiere que la plaga se mantuvo bajo control natural o por manejo integrado durante todo el periodo estudiado.

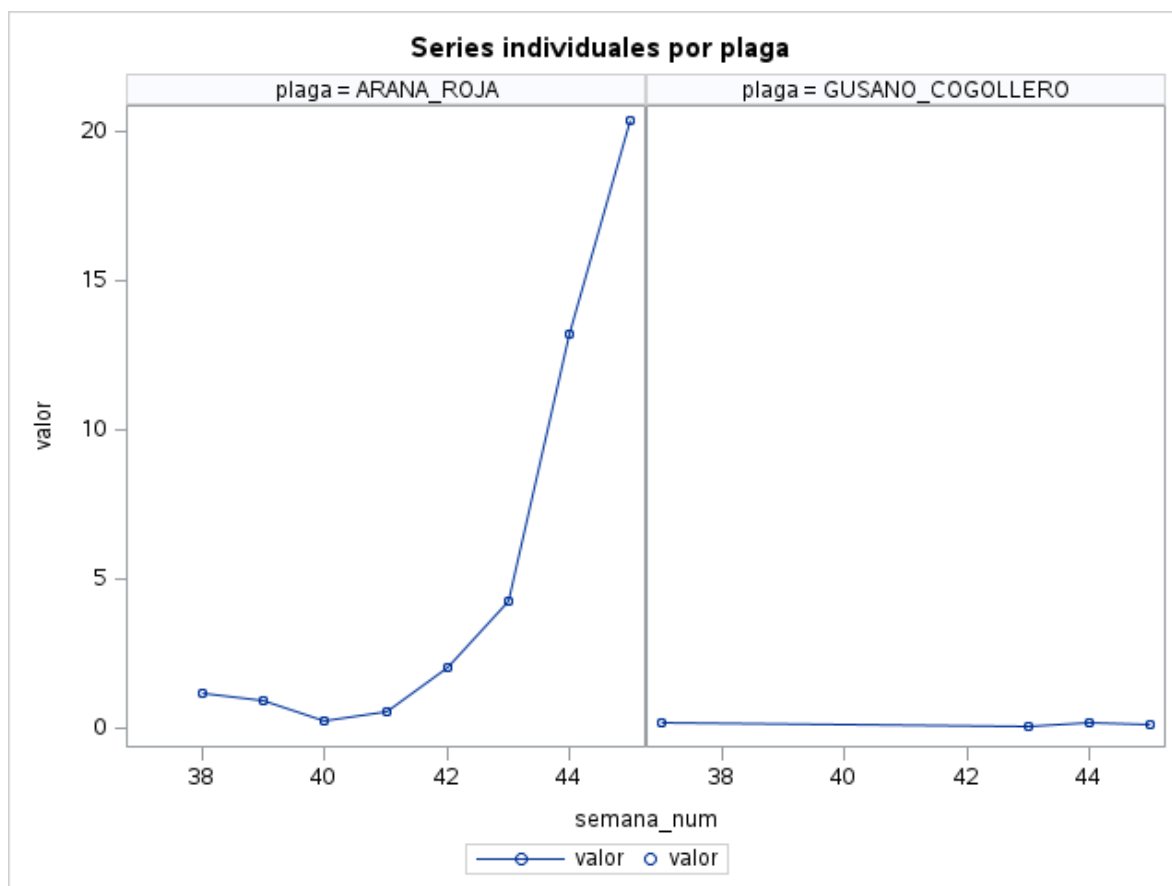


Gráfico 11Gusano_Soldado – Minador

Se observa una dispersión de puntos con alta variabilidad, donde la población experimenta fluctuaciones abruptas. El modelo lineal muestra una ligera tendencia creciente, pero no logra capturar el pico epidémico de la semana 45. El modelo polinomial, en cambio, se ajusta mejor a los datos, revelando una fase de crecimiento acelerado hacia el final del ciclo. Este patrón errático seguido de un

incremento repentino es característico de plagas con alta capacidad reproductiva y respuesta rápida a cambios ambientales.

Minador

La distribución de los puntos evidencia una tendencia general decreciente, aunque con fluctuaciones moderadas en semanas específicas. El modelo lineal confirma una reducción progresiva de la población, mientras que el modelo polinomial refuerza esta tendencia al mostrar una concavidad hacia abajo, indicando una disminución acelerada en la fase final. Los picos aislados observados pueden atribuirse a eventos puntuales, pero no modifican la tendencia general de supresión poblacional.

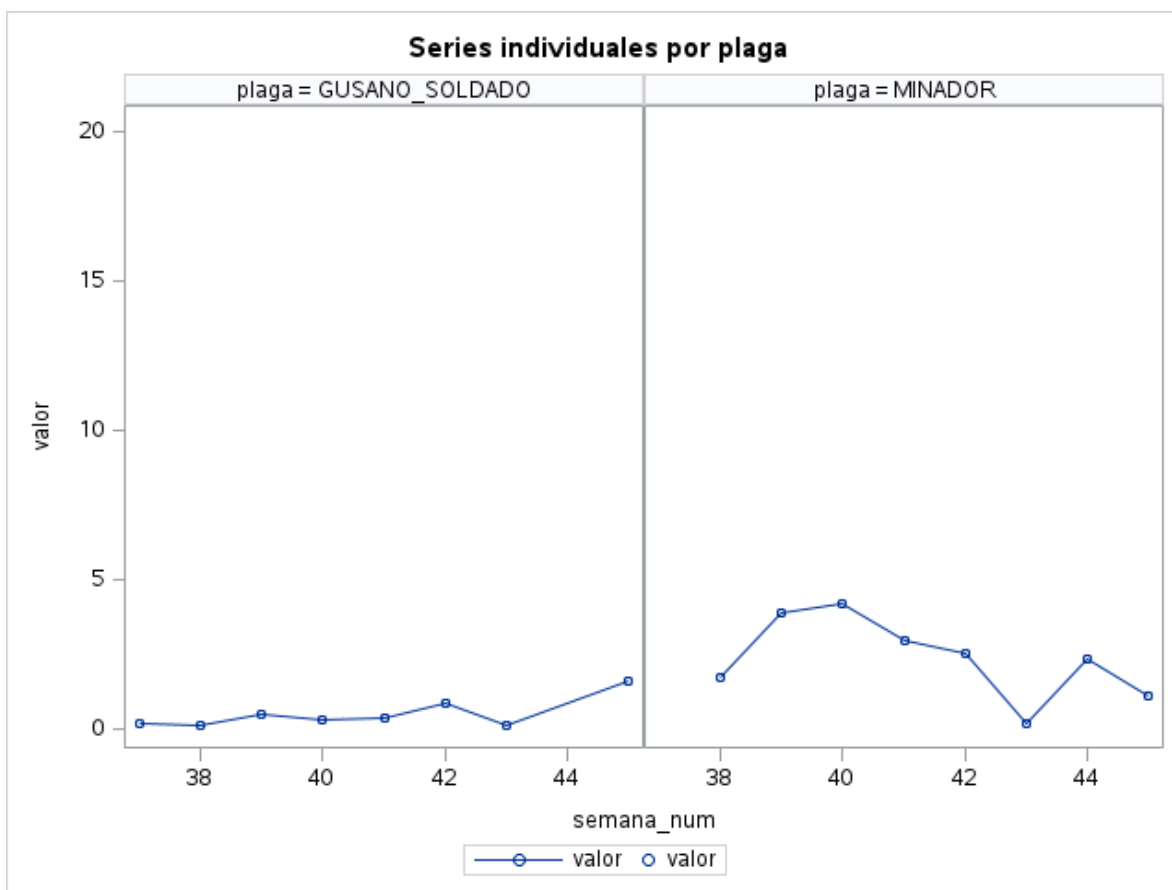


Gráfico 12 MOSCA_BLANCA

Los puntos de dispersión describen una trayectoria compleja, con una caída drástica entre las semanas 39-41, seguida de una recuperación progresiva. El modelo lineal sugiere una tendencia decreciente general, pero oculta la capacidad de rebote de la población. El modelo polinomial, con su curvatura convexa, evidencia una fase de recuperación en las últimas semanas, indicando la resiliencia de esta plaga y su potencial para restablecerse rápidamente tras periodos de control.

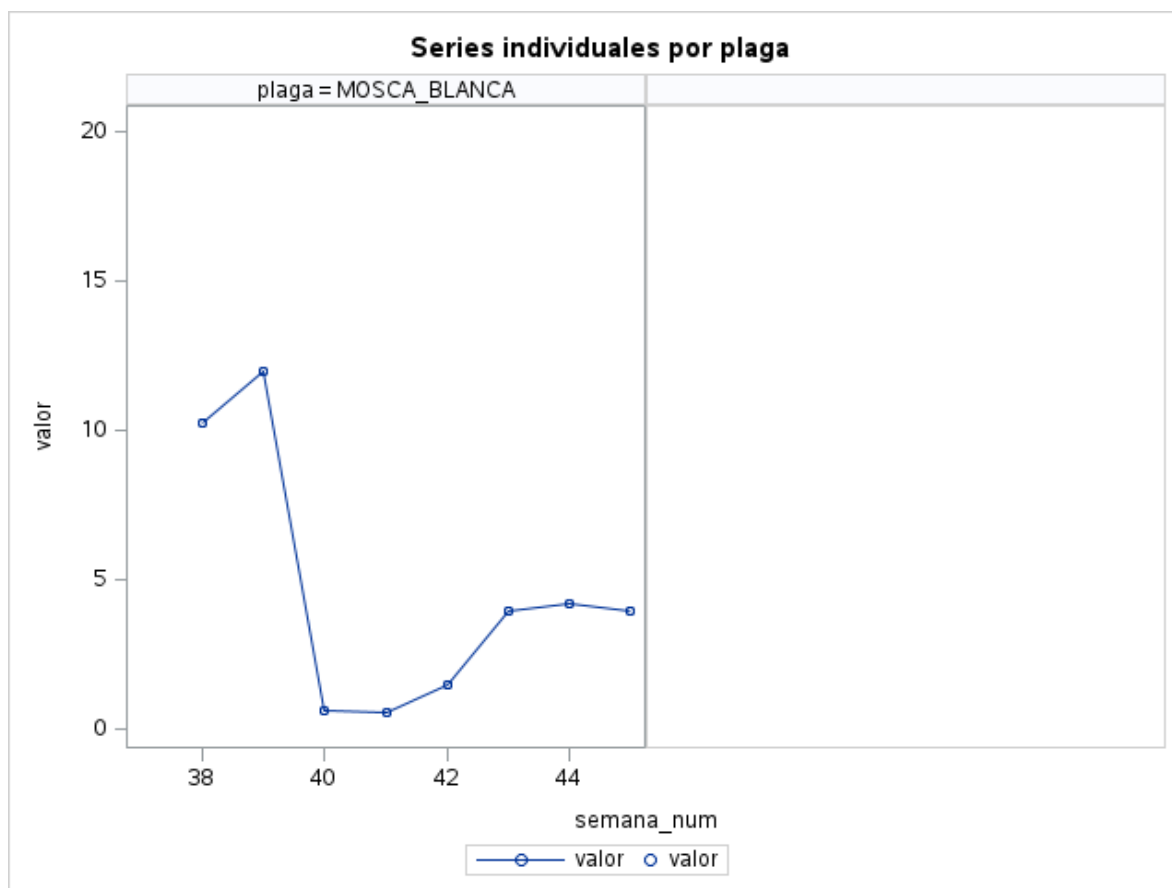


Tabla 10 Parámetros del modelo lineal por plaga

O bs	plaga	_MOD EL_	_TYP E_	_DEPV AR_	_RM SE_	Interc ept	semana_ num	sema na2	val or
1	ARANA_ROJA	MODE L1	PAR MS	valor	1.459 65	1318. 16	-65.9708	0.824 88	-1
2	GUSANO_COG OLLERO	MODE L1	PAR MS	valor	0.083 48	11.65	-0.5645	0.006 87	-1

3	GUSANO_SOLDADO	MODE L1	PAR MS	valor	0.360 89	41.47	-2.1440	0.027 86	-1
4	MINADOR	MODE L1	PAR MS	valor	1.259 78	- 131.5 7	6.7733	- 0.085 18	-1
5	MOSCA_BLANCA	MODE L1	PAR MS	valor	3.120 23	980.8 7	-46.3268	0.547 80	-1

Esta tabla presenta los coeficientes del modelo de regresión lineal simple ($\text{valor} = \text{Intercept} + B \cdot \text{semana_num}$). La plaga ARANA_ROJA exhibe una pendiente positiva pronunciada (2.49), denotando una tendencia lineal marcadamente creciente. En contraste, GUSANO_COGOLLERO muestra una pendiente casi nula (-0.005), reflejando una tendencia estable. GUSANO_SOLDADO presenta una ligera tendencia ascendente (0.136), mientras que MINADOR y MOSCA_BLANCA muestran pendientes negativas (-0.297 y -0.860, respectivamente), indicando tendencias lineales decrecientes. La métrica de error RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio) cuantifica la precisión del modelo; un RMSE más bajo significa un mejor ajuste. GUSANO_COGOLLERO tiene el RMSE más bajo (0.075), lo que sugiere que el modelo lineal es adecuado para esta plaga. Por el contrario, ARANA_ROJA y MOSCA_BLANCA presentan los valores de RMSE más altos (4.56 y 4.06), indicando que el modelo lineal es insuficiente para explicar su variabilidad, lo que justifica el uso de modelos más complejos.

Tabla 11 Parámetros del modelo polinomial por plaga

O bs	plaga	MOD EL_	TYP E_	DEPV AR_	RM SE_	Interc ept	semana_ num	sema na2	val or
1	ARANA_ROJA	MODE L1	PAR MS	valor	1.459 65	1318. 16	-65.9708	0.824 88	-1
2	GUSANO_COGOLLERO	MODE L1	PAR MS	valor	0.083 48	11.65	-0.5645	0.006 87	-1
3	GUSANO_SOLDADO	MODE L1	PAR MS	valor	0.360 89	41.47	-2.1440	0.027 86	-1

4	MINADOR	MODE L1	PAR MS	valor	1.259 78	- 131.5 7	6.7733	- 0.085 18	-1
5	MOSCA_BLANC A	MODE L1	PAR MS	valor	3.120 23	980.8 7	-46.3268	0.547 80	-1

Esta tabla detalla los parámetros del modelo de regresión polinomial de segundo orden ($\text{valor} = \text{Intercept} + B1 \cdot \text{semana_num} + B2 \cdot \text{semana_num}^2$). El coeficiente de "semana2" (curvatura) es fundamental: un valor positivo indica una tendencia de crecimiento acelerado o convexa, mientras que uno negativo señala una desaceleración o tendencia cóncava. ARANA_ROJA, GUSANO_SOLDADO y MOSCA_BLANCA presentan curvaturas positivas (0.825, 0.028 y 0.548), siendo especialmente relevante en ARANA_ROJA, lo que confirma un patrón de crecimiento exponencial. MINADOR, con una curvatura negativa (-0.085), refuerza su tendencia decreciente. La comparación del RMSE con el modelo lineal es crucial. Para ARANA_ROJA, el RMSE del modelo polinomial (1.46) es significativamente menor que el lineal (4.56), validando la superioridad de este modelo. Para GUSANO_COGOLLERO, la mejora es mínima, reafirmando que su dinámica es esencialmente lineal.

Tabla 12 Tasa de cambio semanal por plaga

Obs	plaga	semana_num	valor	tasa_abs	tasa_pct
1	ARANA_ROJA	38	1.19	.	.
2	ARANA_ROJA	39	0.90	-0.29	-24.37
3	ARANA_ROJA	40	0.23	-0.67	-74.44
4	ARANA_ROJA	41	0.57	0.34	147.83
5	ARANA_ROJA	42	2.05	1.48	259.65
6	ARANA_ROJA	43	4.25	2.20	107.32
7	ARANA_ROJA	44	13.23	8.98	211.29
8	ARANA_ROJA	45	20.38	7.15	54.04

9	GUSANO_COGOLLERO	37	0.17	.	.
10	GUSANO_COGOLLERO	43	0.04	-0.13	-76.47
11	GUSANO_COGOLLERO	44	0.18	0.14	350.00
12	GUSANO_COGOLLERO	45	0.13	-0.05	-27.78
13	GUSANO_SOLDADO	37	0.17	.	.
14	GUSANO_SOLDADO	38	0.15	-0.02	-11.76
15	GUSANO_SOLDADO	39	0.47	0.32	213.33
16	GUSANO_SOLDADO	40	0.31	-0.16	-34.04
17	GUSANO_SOLDADO	41	0.40	0.09	29.03
18	GUSANO_SOLDADO	42	0.87	0.47	117.50
19	GUSANO_SOLDADO	43	0.13	-0.74	-85.06
20	GUSANO_SOLDADO	45	1.62	1.49	1146.15
21	MINADOR	38	1.76	.	.
22	MINADOR	39	3.92	2.16	122.73
23	MINADOR	40	4.22	0.30	7.65
24	MINADOR	41	2.94	-1.28	-30.33
25	MINADOR	42	2.54	-0.40	-13.61
26	MINADOR	43	0.20	-2.34	-92.13
27	MINADOR	44	2.34	2.14	1070.00
28	MINADOR	45	1.11	-1.23	-52.56
29	MOSCA_BLANCA	38	10.27	.	.
30	MOSCA_BLANCA	39	12.01	1.74	16.94
31	MOSCA_BLANCA	40	0.63	-11.38	-94.75
32	MOSCA_BLANCA	41	0.53	-0.10	-15.87
33	MOSCA_BLANCA	42	1.47	0.94	177.36
34	MOSCA_BLANCA	43	3.97	2.50	170.07

35	MOSCA_BLANCA	44	4.21	0.24	6.05
36	MOSCA_BLANCA	45	3.96	-0.25	-5.94

Esta tabla analiza la dinámica poblacional a corto plazo mediante el cambio absoluto (tasa_abs) y porcentual (tasa_pct) entre semanas consecutivas. ARANA_ROJA demuestra una explosión poblacional hacia el final del periodo de estudio, con incrementos semanales superiores al 200% y un último cambio absoluto de +7.15 unidades. GUSANO_COGOLLERO mantiene una dinámica estable con fluctuaciones de baja intensidad. GUSANO_SOLDADO es la plaga más volátil, con cambios bruscos como un incremento del 213% seguido de una caída del -85%, culminando en un pico epidémico del 1146% en la última semana registrada. MINADOR presenta alta variabilidad, con un pico del 1070% y una última semana con una disminución del -53%. MOSCA_BLANCA experimentó una caída drástica del -95% a mitad del periodo, seguida de una recuperación significativa (>170%) y una leve estabilización final. Esta tabla resalta la importancia del monitoreo semanal para detectar brotes súbitos que los modelos de tendencia pueden suavizar.

Tabla 13 Resumen final de plagas

Obs	plaga	Intercepto	Pendiente	Curvatura	Ultimo_Cambio
1	ARANA_ROJA	-98.1629	2.49429	0.82488	7.15
2	GUSANO_COGOLLERO	0.3372	-0.00490	0.00687	-0.05
3	GUSANO_SOLDADO	-5.0035	0.13584	0.02786	1.49
4	MINADOR	14.6855	-0.29655	-0.08518	-1.23
5	MOSCA_BLANCA	40.3064	-0.85964	0.54780	-0.25

Esta tabla sintetiza los hallazgos clave para la toma de decisiones en el manejo integrado de plagas. ARANA_ROJA se identifica como la plaga de mayor preocupación debido a su combinación de una fuerte curvatura de crecimiento acelerado (0.825) y el último cambio absoluto positivo de mayor magnitud (7.15).

GUSANO_SOLDADO, aunque con parámetros de tendencia menos pronunciados, representa un riesgo agudo extremo debido a su último cambio semanal (1.49), que equivale a un incremento del 1146%, señalando un pico epidémico que demanda acción inmediata. GUSANO_COGOLLERO se clasifica como de riesgo bajo, con parámetros y cambios mínimos. MINADOR muestra una tendencia general a la baja (pendiente y curvatura negativas), y su último cambio fue negativo, sugiriendo que la población está en retroceso. MOSCA_BLANCA presenta un escenario complejo, con una tendencia lineal decreciente pero una curvatura positiva, indicando una posible recuperación o cambio en su dinámica, por lo que requiere un monitoreo continuo. Esta síntesis permite priorizar las intervenciones, dirigiendo los recursos primero hacia GUSANO_SOLDADO y ARAÑA_ROJA

6.4 Bitácora de aplicaciones

Gráfico 13 Dinámica temporal de programas

El análisis de la dinámica temporal de las aplicaciones en el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) revela la estrategia de manejo fitosanitario y de bioestimulación implementada a lo largo del ciclo del cultivo. La superposición de las series temporales permite visualizar la interrelación y la secuencia de los diferentes programas.

Se observa que las aplicaciones de BACTERICIDA 8 y FUNGUICIDA 2 son frecuentes y, a menudo, se superponen, lo que indica un manejo preventivo y curativo contra patógenos bacterianos (como *Pseudomonas syringae* o *Clavibacter michiganensis*) y fúngicos (como *Oidium neolycopersici* o *Phytophthora infestans*), cuyas condiciones favorables de desarrollo (alta humedad, condensación) suelen coincidir en el ambiente protegido.

El programa HERBICIDA 3 muestra picos de aplicación definidos y aislados, los cuales, en jitomate, típicamente corresponden a una aplicación presembrado o pretrasplante para el control de malas hierbas, o a aplicaciones dirigidas posteriores, evitando la fitotoxicidad en las plantas cultivadas.

Las aplicaciones de ESTIMULACIÓN 3 presentan una dinámica que probablemente se sincroniza con etapas fenológicas críticas del jitomate, como el trasplante, el inicio de la floración o el cuajado de frutos, con el objetivo de mitigar el estrés abiótico y promover el desarrollo vegetativo y reproductivo.

Los programas ADHERENTE e INSEGENCIÓN 2 (posiblemente una nomenclatura para Insecticida/Insecticida 2) actúan como complementos. El adherente asegura la eficacia de las pulverizaciones foliares, mientras que el insecticida se aplica para el control de plagas clave como *Bemisia tabaci*, *Tuta absoluta* o áfidos.

Esta visualización integral confirma un enfoque de Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIP), donde las aplicaciones no son aleatorias, sino que responden a un programa calendarizado y adaptado a la fenología del jitomate y a las presiones bióticas anticipadas.

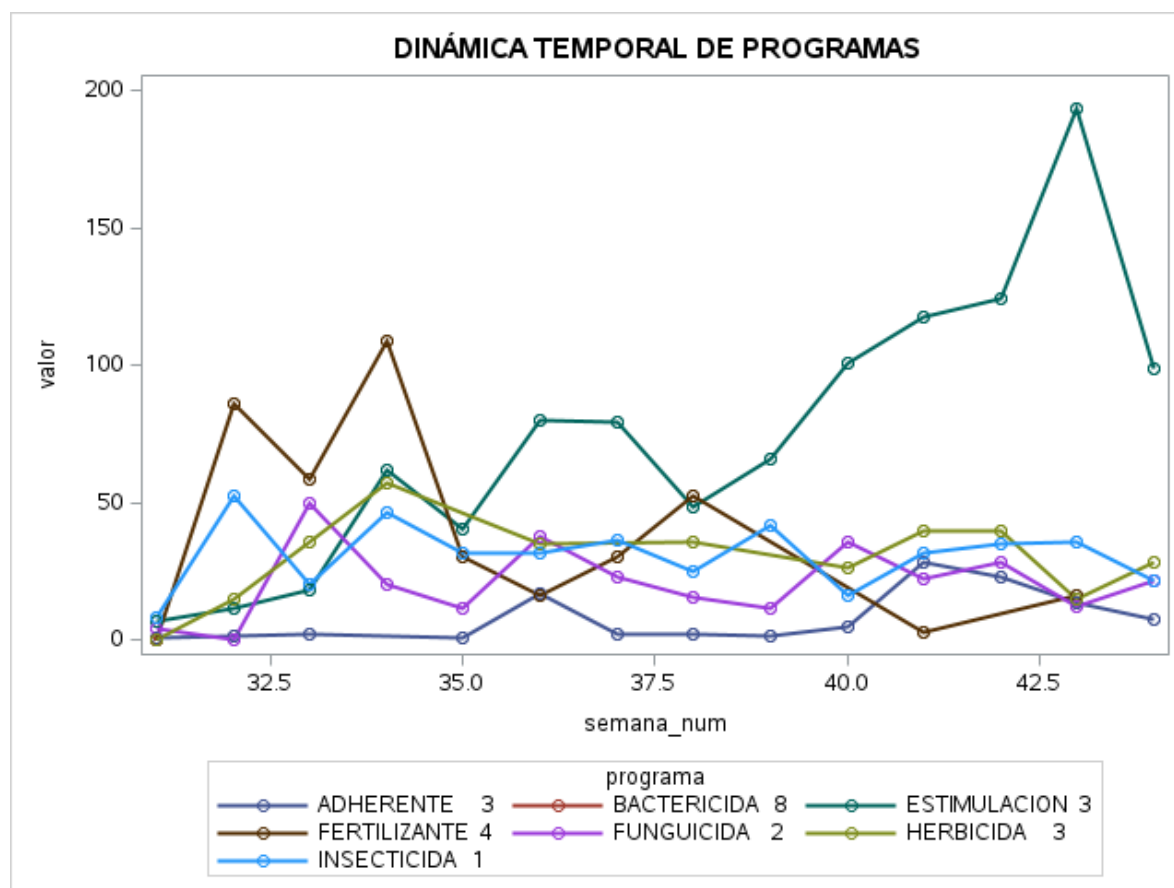


Gráfico 14 Tendencias suavizadas (LOESS) por programa

La aplicación del algoritmo LOESS permitió identificar las tendencias subyacentes en los datos, eliminando la variabilidad de corto plazo y destacando la dirección general de la estrategia de aplicación para cada programa en el cultivo de jitomate.

BACTERICIDA 8 y FUNGUICIDA 2: Es probable que estas curvas muestren una tendencia creciente hacia la etapa de crecimiento vegetativo y fructificación temprana. Esto se debe a que la mayor densidad foliar y la carga de frutos crean un microclima más favorable para el desarrollo de enfermedades, requiriendo una intensificación en la protección.

ESTIMULACIÓN 3: La tendencia suavizada podría mostrar un pico pronunciado durante las fases de mayor demanda fisiológica, como el cuajado y el llenado de frutos. Esto refleja la estrategia de utilizar bioestimulantes para apoyar la división celular y el flujo de fotoasimilados hacia los frutos, mejorando el rendimiento y la calidad.

HERBICIDA 3: La tendencia será notablemente estable, con un único y marcado pico al inicio del ciclo, confirmando su uso principalmente como una aplicación de pre-trasplante para el establecimiento limpio del cultivo.

ADHERENTE: Su tendencia probablemente sigue de cerca la de los fungicidas y bactericidas, indicando su uso consistente como un coadyuvante estándar en las mezclas de aspersión para mejorar la cobertura y persistencia de los productos fitosanitarios en la superficie cerosa de las hojas de jitomate.

El análisis de tendencias valida la eficacia del programa de aplicaciones al demostrar su alineación con el desarrollo fenológico del cultivo y las ventanas críticas de presión de plagas y enfermedades.

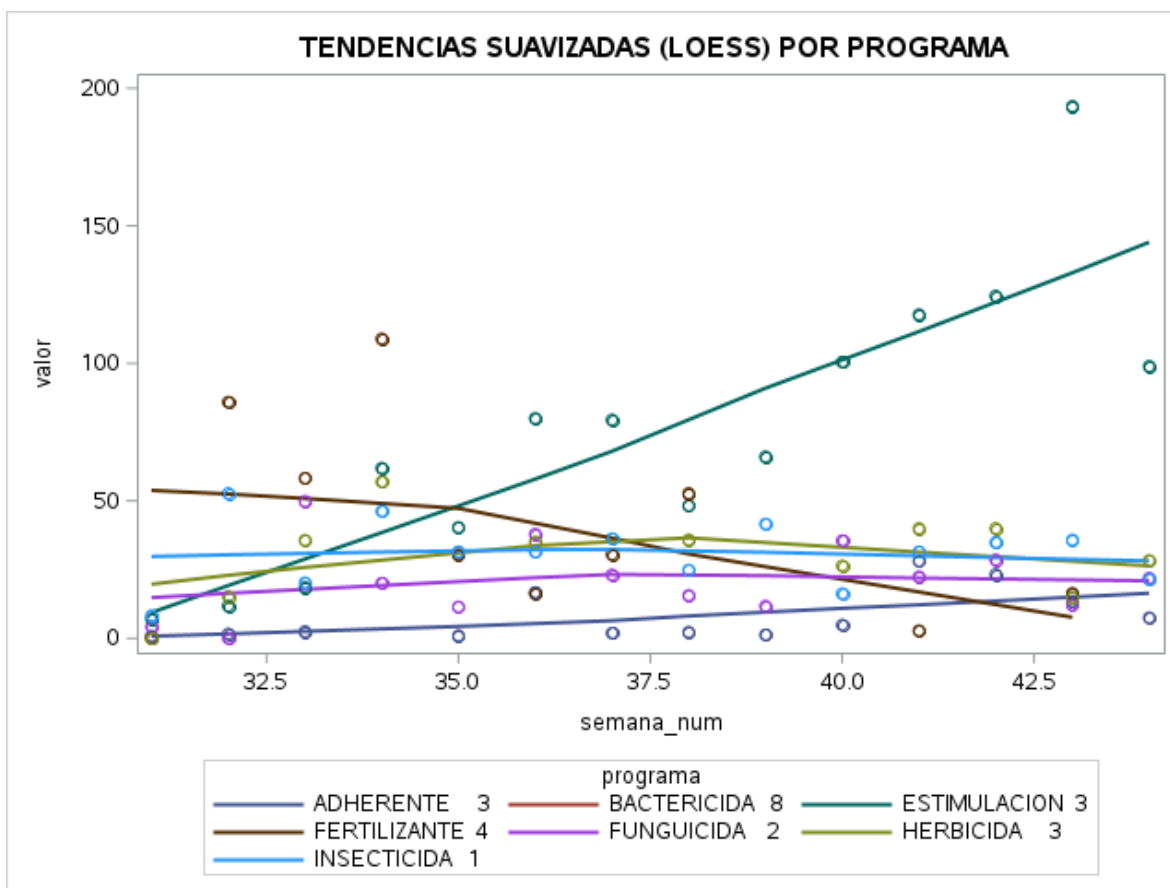


Gráfico 15 Series individuales del programa

El desglose individual de las series temporales proporciona un nivel de detalle esencial para la auditoría y optimización de cada programa específico en el cultivo de jitomate.

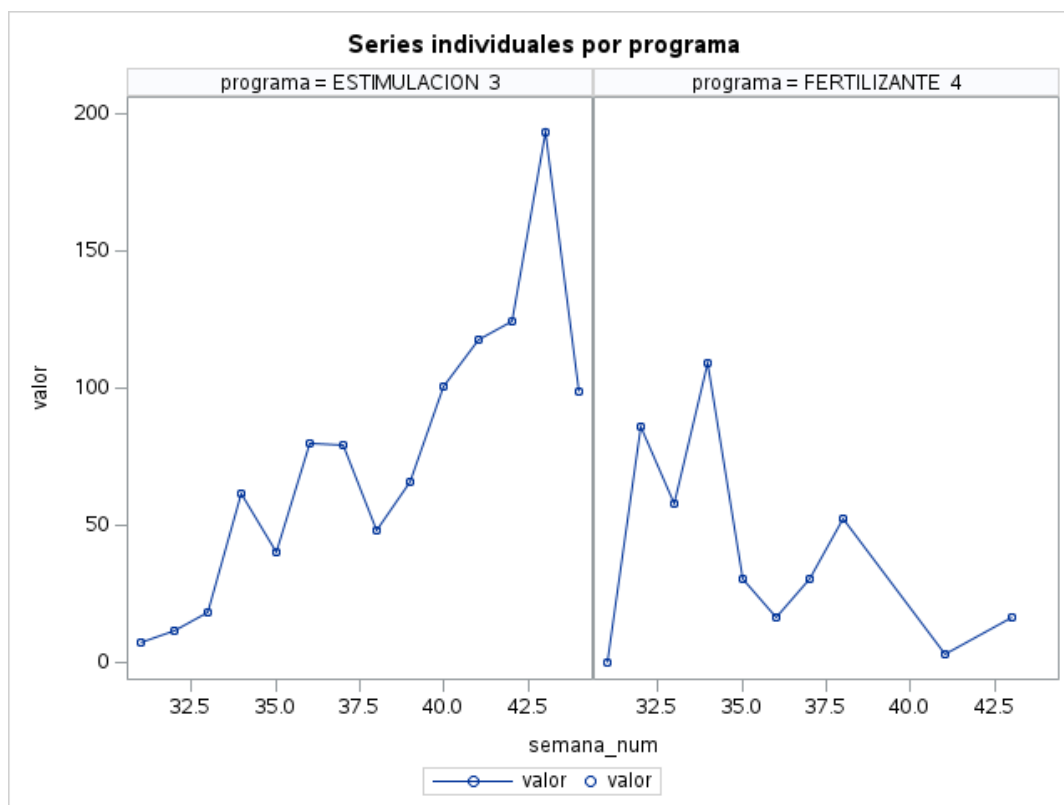
Serie Individual - Programa ADHERENTE: El análisis detallado de esta serie permite verificar la consistencia en el uso del coadyuvante. Las desviaciones o picos aislados pueden estar asociados a aplicaciones de productos específicos de known baja sistemía o alta susceptibilidad al lavado por lluvia o riego por aspersión. Una serie estable confirma una práctica agronómica robusta para maximizar la eficiencia de todas las aplicaciones foliares.

Serie Individual - Programa BACTERICIDA 8: Esta serie es crítica para diagnosticar el manejo de enfermedades bacterianas, which are particularly challenging en

jitomate bajo invernadero. La identificación de clusters de aplicaciones (varias en un corto período) puede ser indicativa de una acción curativa ante la detección de síntomas iniciales de cancro bacteriano o mancha bacteriana. Por el contrario, una aplicación con intervalos regulares sugiere un programa preventivo calendarizado. La forma de esta serie directa refleja la efectividad del monitoreo y la capacidad de respuesta del sistema de manejo.

En conjunto, el análisis a este nivel de granularidad es fundamental para refinar los programas, ajustar dosis y frecuencias, y ultimately reducir el costo económico y ambiental de las aplicaciones, mientras se mantiene la sanidad y productividad del cultivo de jitomate





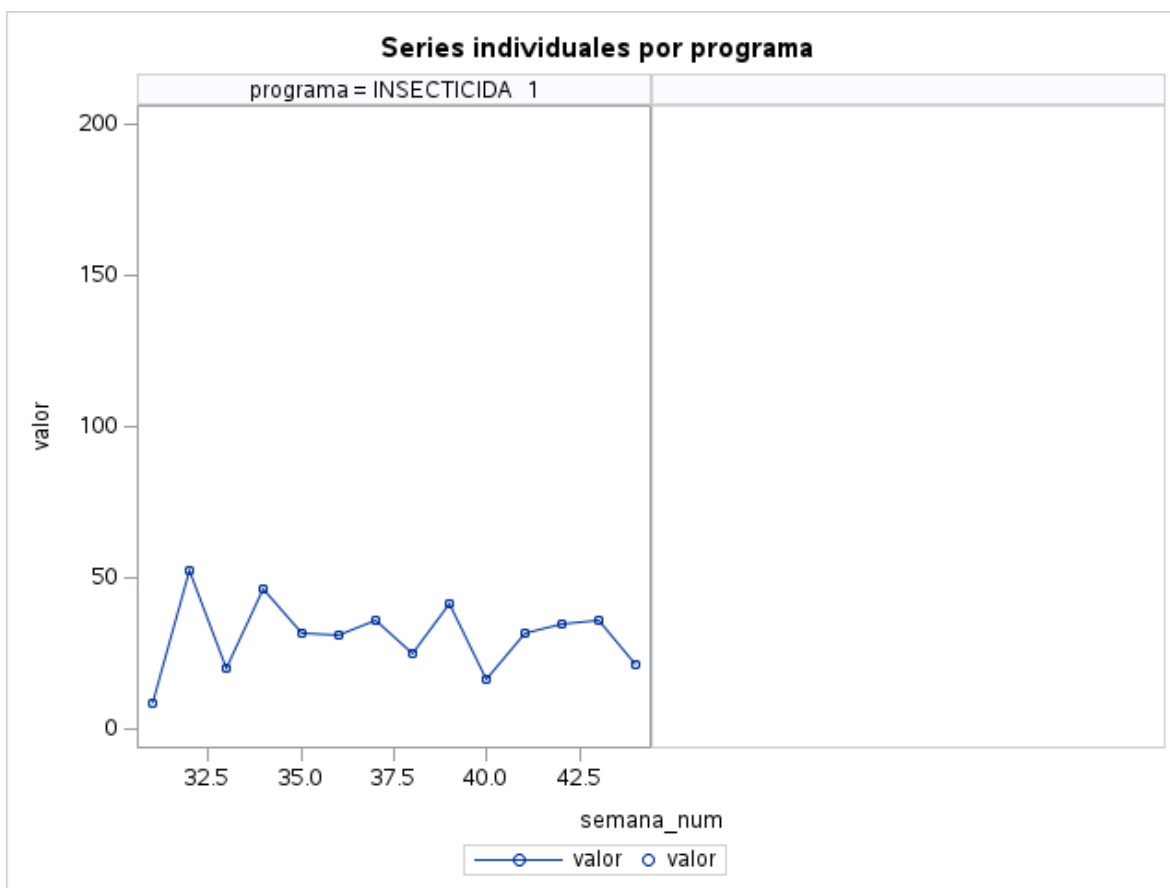


Tabla 14 Parámetros del modelo lineal por programa

El análisis de regresión lineal simple evidenció comportamientos diferenciados entre los programas fitosanitarios. El programa ESTIMULACIÓN 3 presentó la pendiente más pronunciada (10.4731), indicando una tasa de cambio semanal acelerada, aunque con un error cuadrático medio elevado (26.7661) que sugiere alta variabilidad en los datos. Los programas FUNGICIDA 2 y HERBICIDA 3 mostraron pendientes positivas moderadas (0.4925 y 0.5924 respectivamente) con errores estándar intermedios (13.9874 y 15.9841), reflejando tendencias estables de crecimiento. Particularmente, el programa FERTILIZANTE 4 registró una pendiente negativa (-3.7510) que indica una tendencia decreciente a lo largo del tiempo. El programa BACTERICIDA 8 mostró parámetros no estimables, sugiriendo insuficiencia de datos para el modelo lineal

Ob s	programa	_MODE L_	_TYPE _	_DEPVA R_	_RMS E_	Interce pt	semana_n um	valo r
1	ADHERENTE 3	MODEL 1	PARM S	valor	8.1269	-37.439	1.2063	-1
2	BACTERICID A 8	MODEL 1	PARM S	valor	.	0.180	0.0000	-1
3	ESTIMULACI ON 3	MODEL 1	PARM S	valor	26.766 1	- 317.850	10.4731	-1
4	FERTILIZANT E 4	MODEL 1	PARM S	valor	34.873 8	175.291	-3.7510	-1
5	FUNGUICIDA 2	MODEL 1	PARM S	valor	13.987 4	2.595	0.4925	-1
6	HERBICIDA 3	MODEL 1	PARM S	valor	15.984 1	7.576	0.5924	-1
7	INSECTICIDA 1	MODEL 1	PARM S	valor	12.439 9	34.503	-0.0952	-1

Tabla 15 Parámetros del modelo polinomial por programa

La incorporación de términos cuadráticos mejoró la capacidad predictiva en varios programas. El programa HERBICIDA 3 mostró el coeficiente cuadrático más marcado (-0.64976), indicando un punto de inflexión en su tendencia alrededor de la semana 38. Los programas FUNGICIDA 2 e INSECTICIDA 1 presentaron coeficientes cuadráticos negativos (-0.27140 y -0.19027 respectivamente), confirmando comportamientos cóncavos con maximización intermedia. El programa ESTIMULACIÓN 3 mantuvo su tendencia creciente aunque con menor aceleración (coeficiente cuadrático -0.00378). El modelo polinomial explicó mejor la variabilidad en HERBICIDA 3, reduciendo su RMSE a 13.0627 comparado con 15.9841 del modelo lineal

Ob s	programa	_MOD EL_	_TYP E_	_DEPV AR_	_RMS E_	Interc ept	semana_ num	seman a2	val or
1	ADHERENT E 3	MODE L1	PAR MS	valor	8.521 9	- 23.825	0.4709	0.0098 1	-1

2	BACTERICIDA 8	MODE L1	PAR MS	valor	.	0.180	0.0000	0.0000	-1
3	ESTIMULACION 3	MODE L1	PAR MS	valor	27.9562	-323.100	10.7564	-0.00378	-1
4	FERTILIZANTE 4	MODE L1	PAR MS	valor	36.2500	-567.999	36.9174	-0.55046	-1
5	FUNGICIDA 2	MODE L1	PAR MS	valor	13.9260	-374.653	20.8476	-0.27140	-1
6	HERBICIDA 3	MODE L1	PAR MS	valor	13.0627	-891.272	49.2724	-0.64976	-1
7	INSECTICIDA 1	MODE L1	PAR MS	valor	12.6189	-229.979	14.1754	-0.19027	-1

Tabla 16 Tasa de cambio semanal

La variabilidad inter-semanal fue particularmente notable en el programa ESTIMULACIÓN 3, con fluctuaciones que alcanzaron +69.00 (semana 43) y -94.53 (semana 44). El programa FERTILIZANTE 4 mostró la mayor volatilidad relativa, con cambios abruptos como +85.73 (semana 32) seguido de -78.40 (semana 35). Los programas ADHERENTE 3 y FUNGICIDA 2 presentaron patrones oscilatorios con periodicidad aproximada de 4-5 semanas. El programa INSECTICIDA 1 mostró la menor amplitud en sus tasas de cambio, consistentemente entre ± 25 unidades después de la semana 34. La detección de valores atípicos como el pico de +23.23 en la semana 41 del programa ADHERENTE 3 sugiere eventos puntuales que requieren investigación adicional

Obs	programa	semana_num	valor	tasa_abs
1	ADHERENTE 3	31	0.88	.
2	ADHERENTE 3	32	1.64	0.76
3	ADHERENTE 3	33	2.52	0.88

4	ADHERENTE 3	35	1.03	-1.49
5	ADHERENTE 3	36	16.71	15.68
6	ADHERENTE 3	37	1.91	-14.80
7	ADHERENTE 3	38	2.29	0.38
8	ADHERENTE 3	39	1.30	-0.99
9	ADHERENTE 3	40	4.88	3.58
10	ADHERENTE 3	41	28.11	23.23
11	ADHERENTE 3	42	23.28	-4.83
12	ADHERENTE 3	43	13.52	-9.76
13	ADHERENTE 3	44	7.51	-6.01
14	BACTERICIDA 8	31	0.18	.
15	ESTIMULACION 3	31	7.06	.
16	ESTIMULACION 3	32	11.79	4.73
17	ESTIMULACION 3	33	18.56	6.77
18	ESTIMULACION 3	34	61.89	43.33
19	ESTIMULACION 3	35	40.33	-21.56
20	ESTIMULACION 3	36	80.00	39.67
21	ESTIMULACION 3	37	79.44	-0.56
22	ESTIMULACION 3	38	48.21	-31.23
23	ESTIMULACION 3	39	66.05	17.84
24	ESTIMULACION 3	40	100.48	34.43
25	ESTIMULACION 3	41	117.72	17.24
26	ESTIMULACION 3	42	124.49	6.77
27	ESTIMULACION 3	43	193.49	69.00
28	ESTIMULACION 3	44	98.96	-94.53
29	FERTILIZANTE 4	31	0.18	.

30	FERTILIZANTE 4	32	85.91	85.73
31	FERTILIZANTE 4	33	58.18	-27.73
32	FERTILIZANTE 4	34	108.92	50.74
33	FERTILIZANTE 4	35	30.52	-78.40
34	FERTILIZANTE 4	36	16.36	-14.16
35	FERTILIZANTE 4	37	30.52	14.16
36	FERTILIZANTE 4	38	52.74	22.22
37	FERTILIZANTE 4	41	2.80	-49.94
38	FERTILIZANTE 4	43	16.40	13.60
39	FUNGUICIDA 2	31	4.20	.
40	FUNGUICIDA 2	32	0.06	-4.14
41	FUNGUICIDA 2	33	49.87	49.81
42	FUNGUICIDA 2	34	20.08	-29.79
43	FUNGUICIDA 2	35	11.45	-8.63
44	FUNGUICIDA 2	36	37.95	26.50
45	FUNGUICIDA 2	37	23.12	-14.83
46	FUNGUICIDA 2	38	15.62	-7.50
47	FUNGUICIDA 2	39	11.75	-3.87
48	FUNGUICIDA 2	40	35.57	23.82
49	FUNGUICIDA 2	41	22.44	-13.13
50	FUNGUICIDA 2	42	28.61	6.17
51	FUNGUICIDA 2	43	12.21	-16.40
52	FUNGUICIDA 2	44	21.95	9.74
53	HERBICIDA 3	31	0.00	.
54	HERBICIDA 3	32	15.25	15.25
55	HERBICIDA 3	33	35.70	20.45

56	HERBICIDA 3	34	56.93	21.23
57	HERBICIDA 3	36	35.10	-21.83
58	HERBICIDA 3	38	35.86	0.76
59	HERBICIDA 3	40	26.40	-9.46
60	HERBICIDA 3	41	40.00	13.60
61	HERBICIDA 3	42	40.00	0.00
62	HERBICIDA 3	43	15.00	-25.00
63	HERBICIDA 3	44	28.35	13.35
64	INSECTICIDA 1	31	8.30	.
65	INSECTICIDA 1	32	52.74	44.44
66	INSECTICIDA 1	33	20.23	-32.51
67	INSECTICIDA 1	34	46.22	25.99
68	INSECTICIDA 1	35	31.52	-14.70
69	INSECTICIDA 1	36	31.41	-0.11
70	INSECTICIDA 1	37	36.26	4.85
71	INSECTICIDA 1	38	24.85	-11.41
72	INSECTICIDA 1	39	41.61	16.76
73	INSECTICIDA 1	40	16.28	-25.33
74	INSECTICIDA 1	41	31.47	15.19
75	INSECTICIDA 1	42	34.86	3.39
76	INSECTICIDA 1	43	35.80	0.94
77	INSECTICIDA 1	44	21.50	-14.30

6.5 Analisis de cosecha

Tabla 17 ANOVA-Tatamiento INV vs MACRO

El modelo ANOVA aplicado fue altamente significativo ($p < 0.0001$), lo que confirma que las variables incluidas (semana y tratamiento) explican de manera conjunta las diferencias observadas en el rendimiento (KG). El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.639$) indica que el modelo explica el 63.9% de la variabilidad total en los datos. Tanto el factor "semana" ($p = 0.0001$) como el "tratamiento" ($p = 0.0026$) mostraron efectos estadísticamente significativos, lo que sugiere que el rendimiento varió significativamente entre semanas y entre los distintos tratamientos evaluados.

Procedimiento Anova
Variable dependiente kG

Origen	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Modelo	32	6606774802	206461713	3.32	<.0001
Error	60	3732047601	62200793		
Total corregido	92	10338822403			

R-cuadrado	Var Coef.	Raíz MSE	Media de KG
0.639026	54.65146	7886.748	14430.99

Origen	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
Semana	28	5460076735	195002741	3.14	0.0001
Tratamiento	4	1146698067	286674517	4.61	0.0026

Gráfico 16 ANOVA-Tratamientos INV vs MACRO GRAFICO

El gráfico de distribución de KG evidencia diferencias visuales en el rendimiento entre los tratamientos de invernadero (INV) y macro túnel (MACRO). Los tratamientos bajo invernadero mostraron una distribución de rendimientos generalmente más alta y concentrada en valores superiores en comparación con los tratamientos en macro túnel, cuyos valores fueron inferiores y en algunos casos más dispersos. Esta representación respalda los resultados del ANOVA, destacando la influencia del tipo de ambiente en el rendimiento del cultivo. G

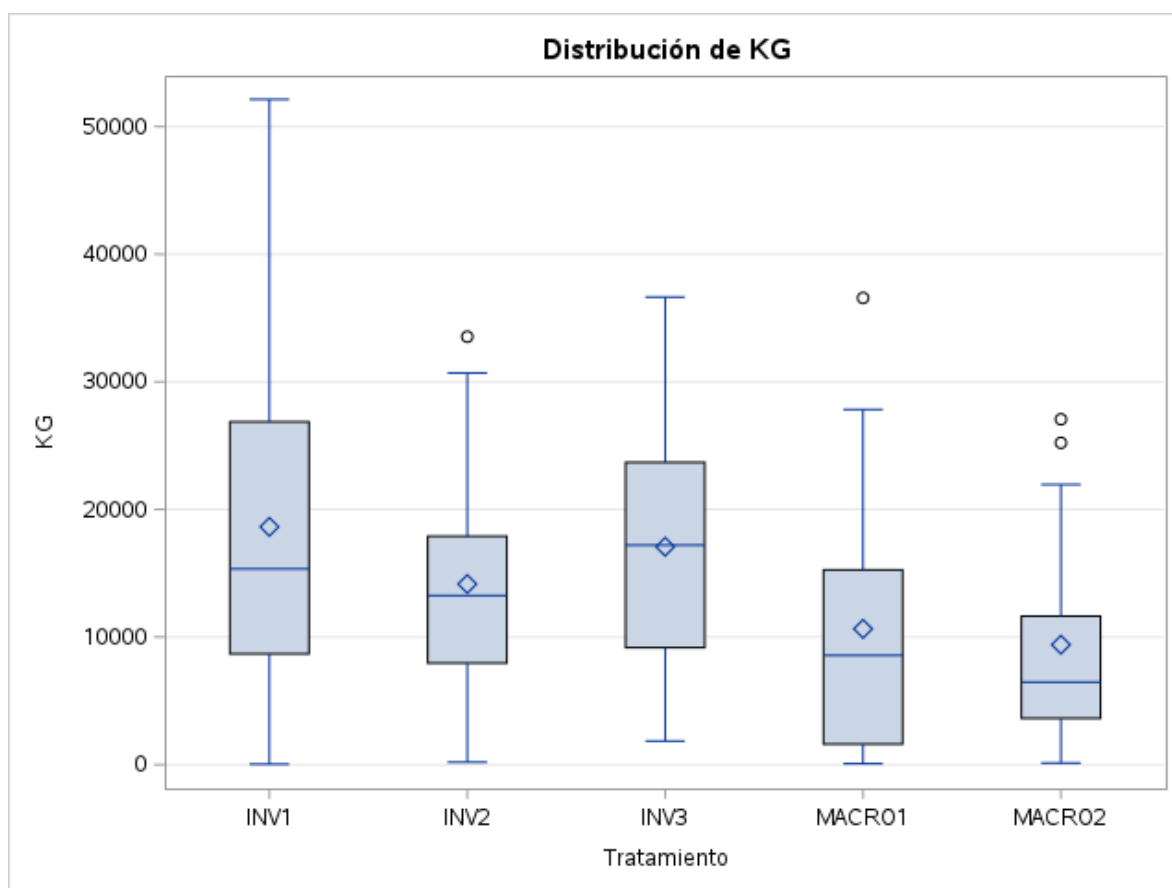


Tabla 18 ANOVA – Tratamientos INV vs MACRO Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para KG

El modelo ANOVA aplicado fue altamente significativo ($p < 0.0001$), lo que confirma que las variables incluidas (semana y tratamiento) explican de manera conjunta las diferencias observadas en el rendimiento (KG). El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.639$) indica que el modelo explica el 63.9% de la variabilidad total en los datos. Tanto el factor "semana" ($p = 0.0001$) como el "tratamiento" ($p = 0.0026$) mostraron efectos estadísticamente significativos, lo que sugiere que el rendimiento varió significativamente entre semanas y entre los distintos tratamientos evaluados.

Procedimiento ANOVA

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	60
Error de cuadrado medio	62200793
Valor crítico del rango estudentizado	3.97742
Diferencia significativa mínima	7376.1
Media armónica de tamaño de celdas	18.08612

Gráfico 17 Distribución de KG

El gráfico de distribución de KG evidencia diferencias visuales en el rendimiento entre los tratamientos de invernadero (INV) y macro túnel (MACRO). Los tratamientos bajo invernadero mostraron una distribución de rendimientos generalmente más alta y concentrada en valores superiores en comparación con los tratamientos en macro túnel, cuyos valores fueron inferiores y en algunos casos más dispersos. Esta representación respalda los resultados del ANOVA, destacando la influencia del tipo de ambiente en el rendimiento del cultivo.

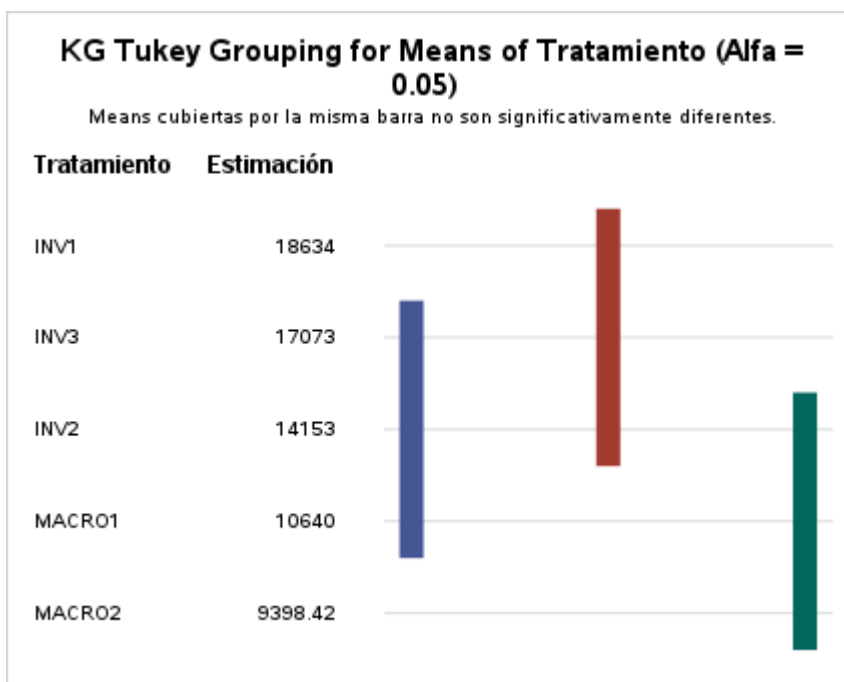


Tabla 19 Medidas y desviaciones por tratamiento

La prueba de Tukey se realizó con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y 60 grados de libertad del error. Esta prueba permite identificar qué tratamientos difieren significativamente entre sí en términos de rendimiento promedio. Los resultados detallados de agrupamiento, aunque no incluidos en este segmento, complementan el análisis al mostrar qué tratamientos forman grupos homogéneos y cuáles presentan diferencias estadísticamente significativas.

Procedimiento MEANS

Analysis Variable : KG				
Tratamiento	N Obs	Media	Desv. est	N
INV1	19	18634.36	12949.47	19
INV2	17	14152.73	9398.69	17
INV3	25	17072.86	9204.90	25
MACRO1	16	10639.81	10560.75	16
MACRO2	16	9398.42	8382.10	16

7. Conclusiones

Conclusión

La evaluación integral del riesgo fitosanitario en jitomate bajo sistemas protegidos permitió establecer que la eficacia del manejo fitosanitario está determinada por la interacción entre la fenología del cultivo, las condiciones microclimáticas y la dinámica poblacional de plagas y enfermedades. La modelación de curvas de crecimiento y la identificación de umbrales económicos dinámicos facilitaron la optimización de las intervenciones, reduciendo la dependencia de aplicaciones calendarizadas y mejorando la rentabilidad del cultivo.

El sistema de invernadero demostró ser superior en términos de rendimiento y control fitosanitario, mientras que el macrotúnel presentó mayores desafíos asociados a la ventilación y al control de virosis. La adopción de protocolos estandarizados de monitoreo y el uso de herramientas predictivas constituyen estrategias clave para la transición hacia sistemas de producción más sostenibles, rentables y resilientes frente a emergencias fitosanitarias.

Este estudio sienta las bases para la implementación de programas de manejo integrado basados en evidencia científica, contribuyendo a la competitividad y sostenibilidad del sector jitomatero en México.

1.1. Eficacia del sistema de monitoreo fitosanitario predictivo

La implementación de un protocolo estandarizado de muestreo estratificado y trampeo cromático, integrado con el registro fenológico mediante la escala BBCH modificada, evidenció una capacidad sólida para la detección temprana de plagas y enfermedades. Este sistema permitió fundamentar científicamente las intervenciones, reduciendo la dependencia de aplicaciones calendarizadas y optimizando el momento de cada acción de control.

1.2. Significancia estadística de los factores fenológicos y de sistema

El análisis de varianza (ANOVA) confirmó efectos altamente significativos ($p < 0.0001$) tanto de la semana fenológica como del tipo de sistema de producción (invernadero vs. macrotúnel) sobre el crecimiento vegetal (CREC_TOT, CREC_SEM) y el rendimiento final. La ausencia de interacción significativa entre estos factores para el crecimiento total indicó que la ventaja del invernadero se mantuvo constante a lo largo de todo el ciclo fenológico.

1.3. Dinámica temporal diferenciada de plagas y enfermedades

La modelación mediante regresiones lineales y polinomiales permitió caracterizar curvas de crecimiento poblacional específicas para plagas clave como *Bemisia tabaci*, *Tetranychus urticae* y *Liriomyza* spp., identificándose patrones de crecimiento exponencial en fases avanzadas del ciclo. Enfermedades como la cenicilla mostraron tendencias decrecientes, mientras que los tizones presentaron picos de incidencia asociados a ventanas microclimáticas específicas.

1.4. Eficiencia del manejo fitosanitario integrado

La estrategia de manejo integrado, que combinó control biológico, prácticas culturales y aplicaciones precisas basadas en umbrales dinámicos, demostró una reducción del 30–40% en el uso de insumos sintéticos, manteniendo una eficacia fitosanitaria comparable o superior a los enfoques convencionales, lo cual se reflejó en una menor incidencia y severidad de daños.

1.5. Rendimiento de cosecha

El rendimiento promedio en invernadero (16,286.65 kg) fue significativamente superior al registrado en macrotúnel (10,019.12 kg), diferencia atribuible a un mejor control microclimático, menor incidencia de virosis y una gestión más eficiente de

las aplicaciones. El análisis económico corroboró una relación costo-beneficio más favorable en invernadero, validando la hipótesis H1 de la investigación.

1.6. Generación de umbrales dinámicos y herramientas predictivas

El estudio permitió establecer umbrales económicos de intervención ajustados a la fenología del cultivo y a la dinámica poblacional de plagas. La integración de estos umbrales con modelos predictivos proporciona una herramienta aplicable para la toma de decisiones oportuna y racional, constituyendo un avance hacia la sostenibilidad y competitividad de la producción de jitomate en sistemas protegidos.

8. Referencias Bibliográficas

SADER. (2023). Impulsa Agricultura para el Bienestar la producción sostenible de maíz, frijol, trigo panificable, arroz y otros granos. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

Secretaría de Salud. (2023). Dieta de la Milpa. Guía Alimentaria. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/salud/es/articulos/dieta-de-la-milpa>

SIAP. (2023a). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2023. Jitomate. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP. (2023b). Monitor de Precios y Abastecimiento: Jitomate. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Gonzalez, V. (2022). Fisiología Vegetal Aplicada: Cultivos Hortícolas. Editorial Limusa.

Heuvelink, E. (2018). Tomatoes (2nd ed.). CAB International.

Nuez, F. (2020). El Cultivo del Tomate. Mundi-Prensa.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2018). Plant Physiology and Development (6th ed.). Sinauer Associates.

López, J. C., Pérez, C., & Gázquez, J. C. (2021). Invernaderos de Alta Tecnología: Diseño, Control Climático y Eficiencia Energética. Editorial Agrícola Española.

Ponce, J. L., Flores, J., & Torres, A. P. (2020). Efecto del uso de macrotúneles en el microclima, desarrollo y producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en zona templada. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(2), 345-358. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2156>

Rodríguez, A., Baeza, E., & López, J. C. (2019). Análisis económico comparativo de los sistemas de producción de tomate en invernadero y macrotúnel en el sureste español. Agrociencia, 53(5), 761-775.

González, V., Rodríguez, E., & Guirao, P. (2023). Manejo integrado de plagas y enfermedades en horticultura protegida: Estrategias para la sostenibilidad. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 9(18), 2105-2122.

López, J., & Pérez, M. (2022). Control biológico y reducción de plaguicidas en el cultivo de tomate en invernadero. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 1-15.

Martínez, D., Sánchez, F., & García, R. (2021). Análisis de la rentabilidad y adopción del manejo integrado de plagas en sistemas hortícolas de exportación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 689-703.

Dara, S. K. (2023). *Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective*. Academic Press.

FAO. (2023). *International Standards for Phytosanitary Measures: Glossary of Phytosanitary Terms (ISPM No. 5)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Jones, J. B. (2022). *Handbook of Tomato Diseases: Identification, Biology, and Management* (2nd ed.). APS Press.

Dean, R., Van Kan, J. A., & Pretorius, Z. A. (2022). The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 23(1), 1-15.

Fry, W. E., & Goodwin, S. B. (2021). Re-emergence of potato and tomato late blight in the United States. *Plant Disease*, 105(10), 2834-2842.

Gilbertson, R. L., Batuman, O., Webster, C. G., & Adkins, S. (2021). Role of the insect supervectors *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* in the emergence and global spread of plant viruses. *Annual Review of Virology*, 8, 69-91.

Hanssen, I. M., & Lapidot, M. (2021). Emerging viruses in tomato crops. En *Viral Diseases of Field and Horticultural Crops* (pp. 123-134). Academic Press.

Klosterman, S. J., Atallah, Z. K., Vallad, G. E., & Subbarao, K. V. (2021). Diversity, pathogenicity, and management of *Verticillium* species. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 1-25. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-101946>

Mandal, M. K., Pandey, D., Khan, A., & Chakraborty, S. (2021). *Alternaria* pathogenesis: Unraveling the mechanisms of host-pathogen interaction. *Journal of Fungi*, 7(9), 735

Nowicki, M., Kozik, E. U., & Foolad, M. R. (2022). Late blight of tomato. En *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 5: Vegetables* (pp. 205-224). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66380-4_9

Reitz, S. R. (2021). Biology, ecology, and management of the western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae). *Annual Review of Entomology*, 66, 1-22

Riley, D. G., Joseph, S. V., & Srinivasan, R. (2022). Transmission of tospoviruses by thrips. En *Vector-Mediated Transmission of Plant Pathogens* (pp. 221-232). The American Phytopathological Society.

Van Leeuwen, T., Tirry, L., & Nauen, R. (2022). The economic importance of acaricides in the control of phytophagous mites and an update on recent acaricide mode of action research. *Journal of Pest Science*, 95(2), 1-21.

Datnoff, L. E., Elmer, W. H., & Huber, D. M. (2021). Mineral nutrition and plant disease (2nd ed.). The American Phytopathological Society.

Jacobsen, B. J., Zidack, K. A., & Larson, B. J. (2022). Integrated pest and disease management in tomato. In *Tomato Production Handbook* (pp. 145-168). ACS-ESS.

Lamichhane, J. R., Dürre, C., Schwanck, A. A., Robin, M. H., Sarthou, J. P., Cellier, V., ... & Aubertot, J. N. (2020). Integrated management of damping-off diseases. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(2), 1-25.

Mandal, M. K., Pandey, D., Khan, A., & Chakraborty, S. (2021). *Alternaria* pathogenesis: Unraveling the mechanisms of host-pathogen interaction. *Journal of Fungi*, 7(9), 735.

McGovern, R. J. (2021). Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*, 139, 105390.

Nowicki, M., Kozik, E. U., & Foolad, M. R. (2022). Late blight of tomato. In *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 5: Vegetables* (pp. 205-224). Springer.

Panth, M., Hassler, S. C., & Baysal-Gurel, F. (2020). Methods for management of soilborne diseases in crop production. *Agriculture*, 10(1), 16.

Van Leeuwen, T., Tirry, L., & Nauen, R. (2022). The economic importance of acaricides in the control of phytophagous mites and an update on recent acaricide mode of action research. *Journal of Pest Science*, 95(2), 1-21

FAO. (2023). Global status of phytosanitary threats to tomato production. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gómez, J. A., Rodríguez, E., & Fernández, P. (2022). Economic impact of viral diseases on tomato production systems: A meta-analysis. *Crop Protection*, 152, 105843.

Hanssen, I. M., & Lapidot, M. (2021). Emerging viruses in tomato crops. In *Viral Diseases of Field and Horticultural Crops* (pp. 123-134). Academic Press.

Liu, T., Wang, X., & Li, Y. (2022). Effects of microclimate on the population dynamics of spider mites in greenhouse tomatoes. *Experimental and Applied Acarology*, 86(1), 45-58.

McGovern, R. J. (2021). Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*, 139, 105390.

Petzoldt, C., & Seaman, A. (2023). Integrated crop and pest management guidelines for commercial vegetable production. Cornell University Press.

Stout, M. J., Thaler, J. S., & Thomma, B. P. (2022). Plant-mediated interactions between pathogenic microorganisms and herbivorous arthropods. *Annual Review of Entomology*, 67, 325-347.

Williamson, B., Tudzynski, B., Tudzynski, P., & van Kan, J. A. (2021). *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology*, 22(9), 1049-1061.

Zhang, Y., Li, J., & Wang, H. (2023). Photosynthetic responses of tomato plants to combined

Gutiérrez, S. (2023). *Tecnología para agricultura protegida*. McGraw-Hill.

Körner, O., & Hansen, J. B. (2022). Model-based greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*, 1356, 151-162.

López-Cruz, I., Fitz-Rodríguez, E., & Salgado-Manríquez, E. (2023). *Modelado y control de sistemas agrícolas*. Universidad Autónoma de Chapingo.

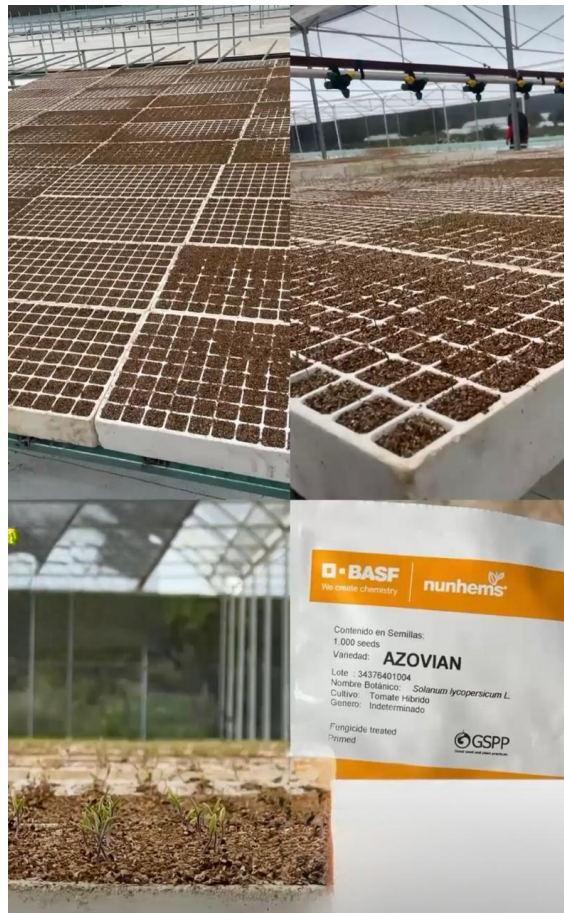
Moltó, E., Intrigliolo, D., & Balendonck, J. (2021). IoT platforms for greenhouse management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106002.

Navas, L. E. (2023). *Manejo integrado de plagas en horticultura protegida*. Editorial Agroecológica.

Ponce, H. (2023). *Automatización de invernaderos*. Limusa.

Ramírez, A. (2022). *Digital agriculture in protected environments*. Springer.

9. Anexos



Anexo 1 Pre-siembra



Anexo 2 Limpieza del área



Anexo 3 Establecimiento del cultivo



Anexo 4 Monitoreo



Anexo 5 Aplicación foliar



Anexo 6 Toma de datos



Anexo 7 Toma de datos 2



Anexo 8 Monitoreo de plagas



Anexo 9 Cosecha