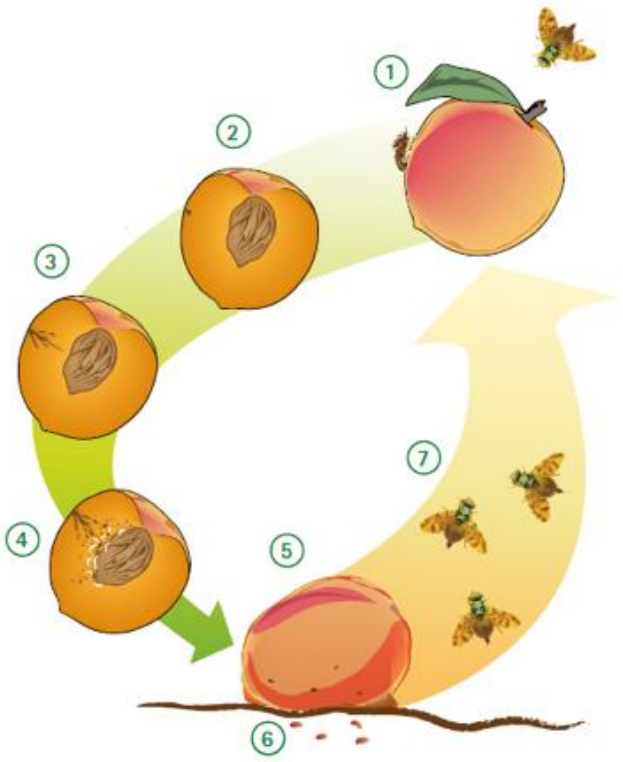
IMPACTO BIOLÓGICO Y EDAFOLÓGICO DEL CONTROL QUÍMICO EN EL MARCO DEL PROGRAMA DE CONTROL DE MOSCA DE LA FRUTA (*Ceratitis Capitata*) EN PEQUEÑOS AGRICULTORES DE MONTE PATRIA

Introducción y contexto local

La comuna de Monte Patria, ubicada en la Provincia de Limarí, Región de Coquimbo, destaca por una rica tradición agrícola sustentada por la pequeña agricultura familiar campesina. La producción de frutales de carozo, cítricos, vides y paltos constituye el motor económico de la zona. Sin embargo, esta tradición se ve tensionada por un modelo de agricultura de monocultivo e insumo-dependiente, el cual se caracteriza por utilizar inputs externos, productos de síntesis química, además de ser hiperdemandante de agua y de recursos públicos, volviendo cada vez más compleja, costosa y vulnerable la producción local.
Asimismo, la posición geográfica y las condiciones microclimáticas de los valles transversales exponen a la agricultura local a constantes desafíos fitosanitarios.
La detección de brotes de la mosca de la fruta (*Ceratitis capitata*) activa protocolos de emergencia fitosanitaria fiscalizados por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG, 2020). Si bien la erradicación de esta plaga es prioritaria para resguardar la fitosanidad regional y el acceso a mercados de exportación, la aplicación sistemática de pesticidas químicos de síntesis en los huertos de los pequeños productores genera externalidades negativas severas, particularmente sobre la salud del suelo y su red trófica (Pimentel, 2005).

Biología de *Ceratitis capitata* y la Dinámica de extinción fitosanitaria

Para comprender la interferencia del control químico, es necesario analizar el ciclo de vida del díptero (FAO/IAEA, 2019):



Fuente: www.sag.gob.cl

- **Fase Aérea / Frutal:** La hembra oviposita bajo la epidermis de los frutos. Las larvas se alimentan de la pulpa, provocando la pudrición y caída prematura de la fruta.
- **Fase Terrestre / Edáfica:** La larva de tercer estadio abandona el fruto caído e ingresa en los primeros centímetros del perfil del suelo (2 a 5 cm) para transformarse en pupa.
- **Fase de Emergencia:** Tras completar la metamorfosis, el adulto emerge del suelo para reiniciar el ciclo reproductivo.

Debido a que la pupación ocurre en la capa superficial de la tierra, las estrategias de control químico tradicionales combinan la aspersión foliar de cebos tóxicos con el drenado, fumigación o aplicación de insecticidas de contacto al suelo (organofosforados, pirotroides y neonicotinoides) para aniquilar tanto a adultos como a pupas (SAG, 2020).

Existe un estrecho vínculo entre el hábito pupal de *Ceratitis capitata* y la degradación de la capa fértil de la tierra. Al dirigir las aplicaciones químicas hacia los primeros centímetros del suelo, precisamente donde la larva busca refugio, la intervención fitosanitaria irrumpe en la zona de mayor actividad biológica del ecosistema (Paul, 2014). Comprender este impacto requiere desplazar la mirada focalizada desde el insecto plaga hacia el suelo como un matriz viva e interactuante, evaluando cómo estos agroquímicos alteran profundamente los procesos metabólicos y microbianos que sostienen la productividad de los huertos.

El suelo como organismo vivo y sus indicadores biológicos

La biología del suelo: El motor de la productividad

El suelo no es un soporte inerte; es un ecosistema dinámico constituido por minerales, materia orgánica, agua, aire y una compleja red de seres vivos (Bunemann et al., 2018). La pequeña agricultura depende directamente de los servicios ecosistémicos proporcionados por el microbioma edáfico:

- **Mineralización y reciclaje de nutrientes:** Transformación de formas orgánicas de nitrógeno, fósforo y azufre en formas inorgánicas asimilables por las raíces (Paul, 2014).
- **Estructuración del suelo:** Formación de agregados mediante la secreción de glomalina y mucílagos bacterianos, garantizando aireación y retención de humedad (Paul, 2014).
- **Supresividad biológica:** Competencia natural y exclusión de patógenos de raíz (*Phytophthora spp.*, *Nematodos*, etc.).

Indicadores clave para evaluar la vida del suelo

Para medir el estado funcional de la biología edáfica frente a intervenciones químicas, se utilizan parámetros bioquímicos y microbiológicos fundamentales:

A. Actividad de Deshidrogenasa (UDH)

La deshidrogenasa es una enzima que existe exclusivamente dentro de células vivas y metabólicamente activas, participando en las rutas de respiración celular. Su medición actúa como un "termómetro" inmediato que indica qué tan acelerado o frenado está el metabolismo energético de la comunidad microbiana (Casida et al.,1964; Dick, 2011).

B. Recuento de Mesófilos Aerobios Totales

Este análisis mide el número de Unidades Formadoras de Colonias por gramo de suelo (UFC/g) de microorganismos viables que requieren oxígeno y se desarrollan en temperaturas moderadas (20°C a 40°C). Representa la "masa de trabajadores" del suelo encargada de la descomposición primaria de materia orgánica (Paul, 2014).

Mediciones y metodología de muestreo de suelo (Protocolo AgriService SpA)

Para evaluar objetivamente la salud microbiana mediante la Actividad de Deshidrogenasa y el Recuento de Mesófilos Aerobios Totales, se realizó toma de muestras de suelo de acuerdo al protocolo estandarizado de AgriService SpA para análisis microbiológicos:

1. **Definición del Punto de Muestreo:** Selección del área bajo la proyección de la copa de los árboles/plantas (zona de goteo), donde se concentra la mayor densidad de raicillas activas y actividad biológica.
2. **Acondicionamiento Superficial**: Retiro cuidadoso de la hojarasca y restos vegetales no descompuestos, evitando alterar la capa mineral de los primeros centímetros del suelo.
3. **Profundidad de Extracción**: Corte a una profundidad de 0 a 20 cm utilizando herramientas desinfectadas con alcohol al 70% entre cada punto para evitar contaminación cruzada.
4. **Muestreo Compuesto**: Obtención de 10 a 12 submuestras por sector homogéneo, homogeneizadas en contenedor limpio para extraer 1 kg de muestra representativa.
5. **Cadena de Frío**: Almacenamiento inmediato en bolsas plásticas herméticas rotuladas y refrigeradas (4°C a 8°C) en hielera isotérmica, asegurando su envío expedito al laboratorio para evitar la deshidratación o muerte de la biomasa microbiana.

Caracterización y ubicación de las muestras evaluadas

Las muestras analizadas por el laboratorio AgriService SpA, provienen de predios representativos de la pequeña agricultura de Monte Patria:

1. **Localidad de La Higuera de Rapel (Agricultora María Angélica Díaz Díaz):**
   - Muestra 1833-1: Sector de huerto de Paltos con tratamiento químico (fumigado/aplicado bajo protocolo de emergencia SAG).
   - Muestra 1833-2: Sector de huerto de Paltos sin tratamiento químico (Testigo natural).
   - Muestra 1833-3: Sector de huerto de Paltos con Tratamiento biológico (manejo con enmiendas orgánicas).
2. **Localidad de Mialqui (Agricultor Roberto Aguilera):**
   - Muestra 1833-4: Sector de Parrón Pisquero sin tratamiento químico (Testigo natural).
   - Muestra 1833-5: Sector de Parrón Pisquero con tratamiento químico (fumigado/ aplicado bajo protocolo de emergencia SAG).

Análisis de resultado de laboratorio e impacto químico

Los datos analíticos obtenidos de muestras de suelo bajo distintos esquemas de tratamiento permiten evidenciar el impacto directo de las intervenciones químicas sobre la ecología edáfica:

ID de muestra	Agricultor y Tratamiento	Humedad (%)	Deshidrogenasa (UDH)	Mesófilos Aerobios (UFC/g)
1833-1	M. Angélica Díaz (La Higuera de Rapel – Paltos). Tratamiento químico	6,4%	60	2,0 x 10^6
1833-2	M. Angélica Díaz (La Higuera de Rapel – Paltos). Sin tratamiento químico (Testigo)	15,0%	83	2,8 x 10^6
1833-3	M. Angélica Díaz (La Higuera de Rapel – Paltos). Tratamiento biológico (enmiendas orgánicas)	16,6%	74	1,4 x 10^6
1833-4	Roberto Aguilera (Mialqui – Parrón). Sin tratamiento químico (Testigo)	2,7%	84	1,8 x 10^6
1833-5	Roberto Aguilera (Mialqui – Parrón). Tratamiento químico	7,3%	80	2,7 x 10^6

Tabla 1*. Resultados de análisis biológico de suelo en laboratorio AgriService.*

Discusión de los resultados

- **Inhibición severa por químico en Palto (La Higuera de Rapel):** La muestra con tratamiento químico (1833-1) registró la menor actividad de deshidrogenasa del estudio (60 UDH), sufriendo una caída del 27,7% en comparación con el suelo testigo no tratado (1833-2, con 83 UDH). Asimismo, los mesófilos disminuyeron un 28,5% (de 2,8 x 10^6 a 2,0 x 10^6 UFC/g). Esto prueba que las aplicaciones de pesticidas no solo reducen el número de microorganismos, sino que estresan y deprimen gravemente el metabolismo respiratorio de los sobrevivientes (Cycon et al.,2019).
- **El estado óptimo del suelo testigo (1833-2):** El huerto sin intervención química de María Angélica Díaz demostró la mayor condición de "suelo vivo", combinando la mayor población microbiana (2,8 x 10^6 UFC/g), alta actividad enzimática (83 UDH) y un contenido idóneo de humedad (15,0%).
- **Comportamiento del manejo biológico (1833-3):** La adición de enmiendas orgánicas mantuvo una excelente humedad (16,6%) y buena actividad (74 UDH), aunque los mesófilos totales descendieron a 1,4 x 10^6 UFC/g. Este fenómeno representa un estado de transición donde los microorganismos aportados por la enmienda compiten temporalmente con la flora nativa antes de reestabilizar la red trófica (Bunemann et al., 2018).
- **Impacto fitosanitario en Parrón Pisquero (Mialqui):** En el predio de Roberto Aguilera, el sector sin fumigar (1833-4) tiene una excelente deshidrogenasa (84 UDH), pero su biomasa está frenada por una sequía crítica (2,7% humedad). En el sector fumigado (1833-5), al rehidratar el suelo la población microbiana reaccionó a 2,7 x 10^6 UFC/g, pero la deshidrogenasa cayó a 80 UDH, confirmando que el químico exige un gasto energético defensivo de las células vivas (Cycon et al., 2019).

Vulnerabilidad del Pequeño Agricultor en Monte Patria

Para la pequeña agricultura de Monte Patria, el deterioro del microbioma por aplicaciones químicas repetidas genera problemas productivos concretos:

- **Dependencia de insumos sintéticos:** La pérdida de actividad enzimática frena la mineralización natural, obligando a comprar fertilizantes solubles.

- **Pérdida de resiliencia y retención de Agua:** Suelos con baja biomasa pierden estructura y capacidad para retener agua en episodios de sequía.

Propuesta de Manejo Integrado y Agroecológico

1. **Solarización y tratamiento térmico del suelo:** Aprovechar la alta radiación solar de Monte Patria mediante la cobertura del suelo regado con plástico transparente de polietileno durante las semanas de mayor temperatura. El calor acumulado bajo la cubierta pasteuriza los primeros centímetros de suelo, destruyendo las pupas de *Ceratitis capitata* sin dejar residuos tóxicos ni alterar químicamente la matriz edáfica.
2. **Sustitución de fumigantes por control cultural:** Rastrillado superficial, limpieza de frutos caídos e inhabilitación mediante compostaje o anaerobiosis.
3. **Priorización de la Técnica del Insecto Estéril (TIE):** Liberaciones masivas para interrumpir el ciclo sin aplicar biocidas en el suelo (FAO/IAEA, 2019).
4. **Restauración biológica post-intervención:** En zonas intervenidas o post-solarización, aplicar compost, biopreparados y coberturas para reactivar y repoblar rápidamente los niveles de deshidrogenasa y mesófilos (Bünemann, 2018).
5. **Pastoreo rotativo o asistido con aves de corral:** Utilizar gallineros móviles (gallineros "trailers") o cerramientos temporales bajo la proyección de las copas de los frutales en la época de mayor caída de fruta o maduración.Realizar un rastrillado superficial o deshierbe previo para exponer las pupas a la vista de las aves y a la desecación solar (Altieri & Nicholls, 2000; Monzó et al., 2009) .
6. **Pozo de emergencia selectivo con malla excluyente (Cámara de emergencia parasitaria):** Es una técnica de trampeo masivo y saneamiento que destruye la plaga mientras preserva y multiplica a sus enemigos naturales. La fruta infestada se deposita en una fosa. Las moscas adultas que eclosionan dentro no pueden atravesar la malla debido a su tamaño. Sin embargo, los microhimenópteros parasitoides de la mosca (como especies de la familia Braconidae), al tener una envergadura significativamente menor, logran escapar y reincorporarse al agroecosistema para parasitar nuevas larvas en el huerto (Aluja & Liedo, 1993; Ovruski et al., 2004).
7. **Saneamiento predial mediante enterrado de fruta con cal:** Esta medida constituye una práctica de saneamiento drástica, orientada a la eliminación directa de la fuente de inóculo y reproducción masiva de la plaga. La cal (óxido o hidróxido de calcio) genera una reacción de alcalinización y deshidratación, acelerando la descomposición del fruto, alterando el pH del medio y destruyendo por contacto las larvas presentes. Asimismo, el sellado con tierra impide la eclosión y salida de los adultos (FAO & OIEA, 2018; Servicio Agrícola y Ganadero [SAG], 2020).

Conclusiones

- Los análisis microbiológicos realizados por el laboratorio AgriService SpA de muestras de suelos tomadas en las localidades de La Higuera de Rapel y Mialqui ponen de manifiesto que los tratamientos químicos aplicados bajo el protocolo de emergencia contra la mosca de la fruta (Ceratitis capitata) impactan negativamente la vida del suelo. La marcada caída en la Actividad de Deshidrogenasa (con disminuciones de hasta un 27,7% en los sectores tratados refleja un fuerte estrés y una reducción directa en el metabolismo celular de la biomasa microbiana, alterando la respiración y la dinámica biológica nativa respecto a los sectores testigo.

- Para resguardar el patrimonio productivo y la fertilidad de los suelos en la pequeña agricultura de Monte Patria, resulta prioritario avanzar hacia una manejo integrado, más sostenible y con enfoque agroecológico. La integración de alternativas sin residuos químicos, como la solarización del suelo para el control térmico de pupas, el saneamiento cultural de huertos, la Técnica del Insecto Estéril (TIE) y la aplicación constante de enmiendas orgánica, podrían ser alternativas factibles para mantener la sanidad fitosanitaria exigida sin comprometer la actividad biológica ni la resiliencia del recurso suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2000).** Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable (1.ª ed.). PNUMA / Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe.
- **Aluja, M., & Liedo, P. (Eds.). (1993).** Fruit flies: Economic importance and biological actions. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2278-9.
- **Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G. B., de Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018).** Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- **Casida, L. E., Klein, D. A., & Santoro, T. (1964).** Soil dehydrogenase activity. *Soil Science*, 98(6), 371-376.
- **Cycoń, M., Mrozik, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2019).** Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-contaminated soil. *Frontiers in Microbiology*, 10, 868.
- **Dick, R. P. (Ed.). (2011).** *Methods of Soil Enzymology*. Soil Science Society of America (SSSA Book Series, No. 9).
- **FAO/IAEA. (2019).** *Manual for Area-Wide Control Programmes against Fruit Flies*. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- **Monzó, C., Sabater-Muñoz, B., Urbaneja, A., & Castañera, P. (2009).** Tracking the foraging activity of generalist predators on Ceratitis capitata (Diptera: Tephritidae) in citrus orchards using molecular tools. Biological Control, 50(2), 189–196. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.03.016.
- **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Organismo Internacional de Energía Atómica. (2018).** Manual para la aplicación de medidas fitosanitarias de saneamiento en áreas de producción de moscas de la fruta. FAO/OIEA. https://www.fao.org/3/I8895EN/i8895en.pdf
- **Ovruski, S. M., Oroño, L. E., & Schliserman, P. (2004).** Control biológico de moscas de la fruta (Diptera: Tephritidae) en la República Argentina: Antecedentes y perspectivas. En A. Urbaneja & A. Garrido (Eds.), Control biológico de plagas agrícolas (pp. 145–160). Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).
- **Paul, E. A. (2014).** *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (4th ed.). Academic Press.
- **Pimentel, D. (2005).** Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. *Environment, Development and Sustainability*, 7(2), 229-252.
- **SAG - Servicio Agrícola y Ganadero. (2020).** Manual de procedimientos para la vigilancia, control y erradicación de moscas de la fruta (Tephritidae). Ministerio de Agricultura de Chile. https://www.sag.gob.cl
- **SAG - Servicio Agrícola y Ganadero de Chile. (2020).** *Programa Nacional de Moscas de la Fruta*. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.