BIBLIOTECA DE SILICIO

CHILE 3.0 · CAPÍTULO TÉCNICO

TOMATE A TIERRA

Suelo · raíz · agua · estrés · sanidad · tejidos · calidad



A CAMPO ABIERTO NO CONTROLAMOS LA TEMPORADA. PODEMOS FORTALECER LA CAPACIDAD DEL CULTIVO PARA RESPONDER A ELLA.

Versión Final · Noviembre 2026

TOMATE A TIERRA: LA MISMA PLANTA, UN SISTEMA MUCHO MÁS EXPUESTO

El tomate a campo abierto no es el tomate de invernadero sin plástico. El suelo real, la exploración radicular, la evaporación, la heterogeneidad del perfil, la variación térmica y la presión sanitaria aumentan el número de funciones que pueden transformarse en limitantes durante la temporada.

La evidencia disponible en tomate muestra que el silicio puede intervenir en varias de esas funciones: estado hídrico, salinidad, fotosíntesis, estrés oxidativo, integridad de tejidos, calidad y defensa. En campo, además, ya existen resultados directos sobre crecimiento, rendimiento, calidad y marchitez bacteriana.

SUELO Y RAÍZ → AGUA Y NUTRICIÓN → FOTOSÍNTESIS → CUAJA Y LLENADO → TEJIDOS → DEFENSA → FRUTA COMERCIALIZABLE

1. TOMATE ACUMULA POCO SILICIO. ESO NO SIGNIFICA QUE NO RESPONDA

Tomate se clasifica como una especie de baja acumulación de silicio en la parte aérea. Sun et al. demostraron que la raíz posee un transportador de entrada funcional, SlLsi1, pero carece de un sistema de eflujo Lsi2 funcional que permita una carga eficiente hacia el xilema [1].

Esa característica explica una concentración foliar históricamente baja; no demuestra ausencia de respuesta biológica. En tomate, la literatura muestra respuestas fisiológicas y productivas incluso cuando la especie no se comporta como una gran acumuladora.

BAJA ACUMULACIÓN NO SIGNIFICA BAJA CAPACIDAD DE RESPUESTA.

2. SUELO Y RAÍZ: EN CAMPO TODO EMPIEZA ABAJO

En un sistema a tierra, la raíz no trabaja dentro de un volumen uniforme. Compactación, textura, profundidad efectiva, distribución del agua, aireación, salinidad y temperatura del suelo pueden cambiar a pocos metros de distancia. Esa heterogeneidad modifica exploración, absorción y continuidad hidráulica antes de que el problema sea visible en la parte aérea.

Por eso el valor potencial del silicio en campo debe leerse primero como protección de función. La evidencia en tomate bajo estrés hídrico y salino muestra mejoras en estado fisiológico, fotosíntesis, rendimiento y productividad del agua [2,3]. Aunque esos estudios se realizaron bajo suelo protegido y goteo, la ruta fisiológica —raíz, agua, iones y carbono— es directamente relevante para un cultivo a tierra.

La evidencia sanitaria refuerza esa lectura radical. Huang, Roberts y Datnoff (2011) demostraron en tomate que el silicio redujo la severidad de Fusarium crown and root rot y retrasó la progresión de la enfermedad desde raíz hacia tallo. Para Tomate a Tierra, esta evidencia es especialmente pertinente: una raíz comprometida por patógenos de suelo no sólo pierde sanidad; pierde capacidad de absorber agua y nutrientes y de sostener el resto de la planta [15].

RAÍZ FUNCIONAL = ABSORCIÓN + CONTINUIDAD HÍDRICA + CAPACIDAD DE SOSTENER PRODUCCIÓN.

EN CAMPO, UNA RAÍZ QUE PIERDE FUNCIÓN TEMPRANO CONDICIONA TODO LO QUE VIENE DESPUÉS.

3. DÉFICIT HÍDRICO Y SALINIDAD: DOS RESTRICCIONES QUE PUEDEN SUMARSE

Una menor disponibilidad de agua reduce expansión, apertura estomática y asimilación de carbono. Una CE elevada agrega dificultad osmótica y desequilibrio iónico. Cuando ambas restricciones coinciden, la planta puede perder función mucho antes de mostrar un colapso visible.

Dou et al. evaluaron tomate fertirrigado bajo déficit de riego y salinidad durante dos temporadas. La aplicación de silicio aumentó rendimiento, productividad del agua y rendimiento de nutrientes bajo estrés combinado; otro análisis del mismo sistema mostró mejoras en rendimiento y atributos de calidad [2,3].

La respuesta bajo salinidad no comienza en 2023. Trabajos previos ya habían mostrado en tomate mejoras en clorofila, eficiencia fotoquímica y actividad antioxidante bajo estrés salino, y otros estudios observaron mejor balance K/Na y Ca/Na y recuperación parcial de biomasa y rendimiento con aporte de silicio [16,17]. En 2026, análisis fisiológicos y transcriptómicos volvieron a mostrar que el silicio puede aliviar la inhibición del crecimiento por NaCl mediante cambios coordinados en metabolismo y regulación génica [18].

La lectura correcta no es “regar menos”. Es conservar capacidad productiva cuando agua o CE se convierten en la tabla más corta del sistema.

EL SILICIO NO ELIMINA LA SEQUÍA NI LA SALINIDAD. AYUDA A QUE LA PLANTA PIERDA MENOS FUNCIÓN CUANDO ESAS RESTRICCIONES DOMINAN.

4. EVIDENCIA DIRECTA EN CAMPO: RENDIMIENTO Y CALIDAD

Hu et al. (2023) evaluaron aplicaciones foliares de silicio y selenio en tomate cultivado en campo. El trabajo incluyó crecimiento, rendimiento y atributos de calidad de fruto, aportando una pieza particularmente valiosa para Tomate a Tierra porque demuestra respuesta del cultivo fuera de un sistema protegido [4].

Su importancia no está en trasladar una dosis o un porcentaje de manera automática. Está en confirmar que la respuesta del silicio no desaparece cuando la planta enfrenta suelo real y ambiente abierto, y que puede expresarse en variables productivas y de calidad comercial.

LA EVIDENCIA DE CAMPO CONFIRMA QUE EL ARGUMENTO NO DEPENDE EXCLUSIVAMENTE DEL INVERNADERO.

5. TEMPERATURA Y ESTRÉS OXIDATIVO: LA TEMPORADA TAMBIÉN PUEDE CAMBIAR POR ARRIBA

A campo abierto, la radiación y la temperatura no están amortiguadas por una estructura. Eventos de calor pueden comprometer membranas, estado hídrico, fotosíntesis, especies reactivas de oxígeno y procesos reproductivos.

En tomate sometido a estrés térmico, Khan et al. observaron que el silicio aumentó biomasa, pigmentos fotosintéticos y contenido relativo de agua, redujo marcadores de daño oxidativo y activó enzimas antioxidantes, proteínas de choque térmico y factores Hsf [5]. Es evidencia directa en tomate sobre el mecanismo, aunque no corresponde a un ensayo de campo abierto.

EL SILICIO NO “ENFRÍA” EL CULTIVO. AUMENTA LA CAPACIDAD DE CONSERVAR FUNCIÓN FRENTE AL CALOR.

6. CALCIO, TEJIDOS Y BLOSSOM-END ROT: UNA RELACIÓN QUE EXIGE PRECISIÓN

Blossom-end rot (BER) no debe reducirse a “falta de calcio en el suelo”. Es un desorden localizado cuya aparición depende del movimiento de agua, crecimiento del fruto, salinidad, temperatura y competencia entre órganos.

En tomate bajo salinidad, Costan et al. observaron menor rendimiento y mayor BER; la incorporación de silicio contrarrestó parte de esas pérdidas y redujo la incidencia respecto del tratamiento salino sin silicio [6]. En condiciones de deficiencia moderada de calcio, la pulverización con silicio también alivió parte del deterioro fisiológico [7].

EL SILICIO NO REEMPLAZA AL CALCIO. PUEDE AYUDAR A CONSERVAR FUNCIÓN CUANDO EL SISTEMA QUE ENTREGA CALCIO AL FRUTO ESTÁ BAJO PRESIÓN.

7. FIRMEZA Y CALIDAD: PRODUCIR KILOS NO BASTA SI SE PIERDE CATEGORÍA

La firmeza se construye durante el desarrollo del fruto y depende de pared celular, pectinas, actividad enzimática y regulación hormonal. Wang et al. encontraron que tratamientos con silicio mejoraron firmeza y redujeron actividad de enzimas asociadas a degradación de pared [8].

Otros trabajos en tomate han mostrado cambios en sólidos solubles, azúcares, vitamina C, carotenoides y compuestos relacionados con calidad [9]. En un sistema a tierra, estas respuestas importan cuando modifican descarte, condición, vida útil o valor efectivo de la fruta.

EL RESULTADO AGRONÓMICO NO TERMINA EN KILOS COSECHADOS. TERMINA EN KILOS COMERCIALIZABLES.

8. SANIDAD DE CAMPO: DEFENSA INDUCIDA Y PRODUCCIÓN PRESERVADA

La presión sanitaria es una de las grandes diferencias entre una temporada abierta y un sistema protegido. En tomate existe evidencia de que el silicio puede participar en priming, señalización defensiva y control oxidativo.

Frente a Alternaria solani, Gulzar et al. observaron retraso de síntomas y menor severidad, junto con mayor expresión de genes asociados a jasmonato, salicilato y etileno y mayor actividad de enzimas antioxidantes [10]. Para Ralstonia solanacearum, la evidencia en tomate es particularmente consistente y se extiende por más de dos décadas. Estudios de 2004, 2007 y 2011 relacionaron la suplementación con silicio con menor progreso de marchitez, modificaciones de polisacáridos pécticos de pared y una respuesta de priming con genes asociados a jasmonato, etileno, estrés oxidativo y defensa [19–21]. Trabajos posteriores añadieron otra dimensión: el silicio puede reducir enfermedad sin actuar simplemente como bactericida, modulando biofilm, EPS y genes de virulencia del patógeno [11]. En 2026 se confirmaron nuevamente respuestas sobre severidad, estrés oxidativo y enzimas defensivas [12].

La serie no autoriza a esperar una respuesta uniforme. Un ensayo 2026 con 5 mM de silicato de potasio mostró incluso mayor severidad bajo sus condiciones experimentales. Ese resultado se incorpora porque confirma una regla esencial: fuente, concentración, vía y contexto importan [22].

LA EVIDENCIA FUERTE NO ES LA QUE OCULTA LOS RESULTADOS INCÓMODOS. ES LA QUE DEFINE CUÁNDO, CÓMO Y CON QUÉ FUENTE APARECE LA RESPUESTA.

EL SILICIO NO ES UN FUNGICIDA NI UN BACTERICIDA UNIVERSAL. AGREGA UNA CAPA DE DEFENSA DEL HOSPEDERO.

9. ÁCIDO MONOSILÍCICO Y AOS: EVIDENCIA DIRECTA EN TOMATE

En tomate existen estudios donde se trabajó directamente con ácido mono/ortosilícico estabilizado. Kleiber et al. evaluaron ácido ortosilícico estabilizado con colina en tomate bajo estrés por manganeso y observaron modificaciones de actividad fotosintética y rendimiento comercial [13].

En otro trabajo que comparó fuentes foliares, el ácido monosilícico se asoció a respuestas favorables en ácido ascórbico, acidez titulable y firmeza del fruto [14]. Estos antecedentes no sustituyen la evidencia de campo, pero muestran que una forma biodisponible de silicio puede expresarse en variables agronómicas concretas en tomate.

Esta distinción es relevante para la Biblioteca 3.0: los silicatos, la sílice, las nanopartículas y el ácido mono/ortosilícico no deben tratarse como fuentes equivalentes. La evidencia del elemento explica qué funciones pueden responder; la forma química y su disponibilidad condicionan cómo se entrega ese silicio al sistema vegetal.

FORMA BIODISPONIBLE → RESPUESTA FISIOLÓGICA → FRUTA.

10. MAPA MULTI: EL RIESGO DOMINANTE CAMBIA, EL RESULTADO A PROTEGER ES EL MISMO

RESTRICCIÓN	FUNCIÓN COMPROMETIDA	DÓNDE TERMINA EL VALOR
Suelo / raíz	Exploración, absorción, continuidad hidráulica	Base para sostener vigor, cuaja y recuperación
Déficit hídrico	Estomas, fotosíntesis, llenado	Producción preservada cuando el agua limita
CE / salinidad	Agua, balance iónico, pigmentos	Menor pérdida de crecimiento y rendimiento bajo estrés
Calor / ROS	Membranas, antioxidantes, fotosíntesis	Conservación de función en eventos térmicos
Ca / BER	Entrega de Ca e integridad distal	Menor sensibilidad del fruto a desórdenes
Sanidad	Defensa inducida y tejido funcional	Menor vulnerabilidad y producción preservada
Firmeza / calidad	Pared celular y condición	Mayor proporción comercializable y menor pérdida de valor
Raíz / Fusarium	Sanidad radicular y continuidad hidráulica	Menor severidad y avance de crown/root rot; producción preservada [15]
Ralstonia	Pared, priming, virulencia y defensa	Menor marchitez en múltiples estudios; respuesta dependiente de fuente/dosis [11,12,19–22]

La lógica del Tonel de Liebig ayuda a ordenar el capítulo: la “tabla más corta” no es fija. Una temporada seca puede desplazarla hacia suelo–raíz–agua; otra hacia salinidad; otra hacia sanidad o integridad de fruto. MULTI no significa sumar todos los beneficios como si ocurrieran a la vez. Significa que una misma herramienta participa en funciones distintas y conserva relevancia cuando cambia la restricción dominante.

MULTI NO MULTIPLICA EL MISMO BENEFICIO. MULTIPLICA LAS VÍAS POR LAS QUE UNA MISMA INVERSIÓN PUEDE PROTEGER EL RESULTADO.

11. VENTANAS FISIOLÓGICAS DE INTERÉS

Este capítulo no reemplaza un protocolo comercial. La evidencia sí permite reconocer momentos donde disponer de silicio tiene lógica fisiológica:

- Construcción de raíz y canopia: preparar absorción, balance hídrico y capacidad fotosintética antes de la máxima demanda.
- Prefloración, floración y cuaja: sostener función durante etapas sensibles a calor, estrés osmótico y desequilibrios.

- Crecimiento y llenado de fruto: acompañar agua, tejidos, entrega de calcio, peso y condición.
- Producción continua: conservar follaje funcional y responder a presión sanitaria y ambiental durante ciclos prolongados.
- Antes de períodos previsibles de estrés: la lógica de priming tiene más sentido antes de que el daño sea irreversible.

LA ESTRATEGIA DEBE SEGUIR LA FISIOLOGÍA DEL CULTIVO, NO UNA REPETICIÓN AUTOMÁTICA DEL CALENDARIO.

12. LECTURA TERRITORIAL PARA CHILE

El tomate a tierra chileno no enfrenta una única realidad. En el Norte Chico pueden dominar agua, salinidad y demanda evaporativa; en zonas interiores de la zona central, calor y déficit hídrico pueden ganar peso; en sectores con suelos heterogéneos o problemas de aireación, la raíz puede convertirse en la primera restricción; y en campañas con alta presión sanitaria, defensa y permanencia de tejido funcional pueden pasar al primer plano.

La lectura territorial evita transformar al silicio en una recomendación uniforme. La pregunta correcta no es “qué beneficio quiero obtener”, sino “qué función está limitando este sistema esta temporada”.

13. PREGUNTAS PARA EL ASESOR TÉCNICO

- ¿Dónde se está perdiendo hoy producción comercializable: suelo/raíz, agua, CE, calor, BER, sanidad, firmeza o calidad?
- ¿La restricción aparece durante toda la temporada o en una ventana específica?
- ¿La pérdida se expresa como menos kilos, más descarte, menor categoría o menor continuidad de cosecha?
- ¿La raíz explora un perfil uniforme o existen sectores con compactación, saturación, salinidad o baja profundidad efectiva?
- ¿La presión sanitaria dominante coincide con mecanismos donde existe evidencia de respuesta al silicio?
- ¿El programa actual ya incluye herramientas para estrés, tejidos, calidad o sanidad que puedan complementarse con una estrategia transversal?

14. CONCLUSIÓN

Tomate a Tierra es un sistema donde la restricción dominante puede cambiar varias veces durante una misma temporada. El suelo y la raíz agregan heterogeneidad; el ambiente abierto expone al cultivo a variación térmica, déficit hídrico y presión sanitaria; y el resultado económico depende de que esa fisiología termine convertida en fruta realmente comercializable.

La evidencia disponible en tomate conecta al silicio con estado hídrico, salinidad, fotosíntesis, estrés oxidativo, bajo calcio/BER, pared celular, firmeza, calidad y defensa inducida. A esa base se suma una línea sanitaria particularmente relevante para campo: evidencia directa frente a Fusarium crown and root rot y una serie histórica de más de veinte años frente a Ralstonia solanacearum, desde pared celular y priming hasta virulencia bacteriana y defensa oxidativa [11,12,15,19–22].

La fortaleza del argumento no está en afirmar que todas esas respuestas ocurrirán juntas. Está en reconocer, siguiendo el Tonel de Liebig, que la tabla más corta cambia. Una campaña puede quedar limitada por raíz y agua; otra por CE; otra por calor o sanidad; otra puede producir kilos suficientes y perder valor por integridad o condición del fruto.

Una herramienta fisiológicamente transversal conserva relevancia porque participa en distintos puntos de esa cadena sin depender de acertar una única amenaza. MULTI no suma beneficios duplicados: ofrece distintas vías para proteger el mismo resultado productivo cuando cambia el riesgo dominante.

A CAMPO ABIERTO NO SABEMOS CUÁL SERÁ EL RIESGO DOMINANTE DE LA TEMPORADA. EL SILICIO AMPLÍA LAS VÍAS PARA PROTEGER FRUTA COMERCIALIZABLE.

BIBLIOGRAFÍA CIENTÍFICA

[1] Sun, H. et al. (2020). Tomato roots have a functional silicon influx transporter but not a functional silicon efflux transporter. Plant, Cell & Environment 43:732–744. DOI: 10.1111/pce.13679.

[2] Dou, Z. et al. (2023). Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. Agricultural Water Management 289:108526. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108526.

[3] Dou, Z. et al. (2023). Exogenous silicon application improves fruit yield and quality of drip-irrigated greenhouse tomato under combined drought and salt stress. Scientia Horticulturae 321:112352.

[4] Hu, W. et al. (2023). Effect of Foliar Application of Silicon and Selenium on the Growth, Yield and Fruit Quality of Tomato in the Field. Horticulturae 9(10):1126. DOI: 10.3390/horticulturae9101126.

[5] Khan, A. et al. (2020). Silicon-induced thermotolerance in Solanum lycopersicum L. via activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. BMC Plant Biology 20:248. DOI: 10.1186/s12870-020-02456-7.

[6] Costan, A. et al. (2020). Interactive effects of salinity and silicon application on tomato growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. Journal of the Science of Food and Agriculture 100:732–743. DOI: 10.1002/jsfa.10076.

[7] de Souza Alonso, T.A. et al. (2020). Silicon spraying alleviates calcium deficiency in tomato plants, but Ca-EDTA is toxic. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 183:659–664. DOI: 10.1002/jpln.202000055.

[8] Wang, J. et al. (2024). Effect of exogenous silicon treatments on cell wall metabolism and textural properties of tomato fruits. Scientia Horticulturae 336:113407. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113407.

[9] Wang, L. et al. (2024). Improvements in the Appearance and Nutritional Quality of Tomato Fruits Resulting from Foliar Spraying with Silicon. Foods 13:223. DOI: 10.3390/foods13020223.

[10] Gulzar, N. et al. (2021). Silicon supplementation improves early blight resistance in Lycopersicon esculentum Mill. by modulating the expression of defense-related genes and antioxidant enzymes. 3 Biotech 11:232. DOI: 10.1007/s13205-021-02789-6.

[11] Silicon Controls Bacterial Wilt Disease in Tomato Plants and Inhibits Virulence-Related Gene Expression of Ralstonia solanacearum. (2022).

[12] Antibacterial activity of different silicon sources against Ralstonia solanacearum of tomato. (2026). Physiological and Molecular Plant Pathology, article 103599. DOI: 10.1016/j.pmpp.2026.103599.

[13] Kleiber, T., Calomme, M. & Borowiak, K. (2015). The effect of choline-stabilized orthosilicic acid on microelements and silicon concentration, photosynthesis activity and yield of tomato grown under Mn stress. Plant Physiology and Biochemistry 96:180–188. DOI: 10.1016/j.plaphy.2015.07.033.

[14] Biofortification of tomato with stabilized alkaline silicate and silicic acid, nanosilica, and potassium silicate via leaf increased ascorbic acid content and fruit firmness (2022). Journal of Plant Nutrition 45:896–903. DOI: 10.1080/01904167.2021.1994599.

[15] Huang, C.H., Roberts, P.D. & Datnoff, L.E. (2011). Silicon Suppresses Fusarium Crown and Root Rot of Tomato. Journal of Phytopathology. DOI: 10.1111/j.1439-0434.2011.01803.x.

[16] Al-Aghabary, K., Zhu, Z. & Shi, Q. (2004). Influence of Silicon Supply on Chlorophyll Content, Chlorophyll Fluorescence, and Antioxidative Enzyme Activities in Tomato Plants Under Salt Stress. Journal of Plant Nutrition 27. DOI: 10.1081/LPLA-200034641.

[17] Silicon enhances the tolerance to moderate NaCl-salinity in tomato grown in a hydroponic recirculating system (2021). Journal of Plant Nutrition. DOI: 10.1080/01904167.2021.1963772.

[18] Wang et al. (2026). Physiological and transcriptomic analyses reveal that exogenous silicon alleviate the response of tomato to salt stress. Plant Signaling & Behavior. DOI: 10.1080/15592324.2026.2652178.

[19] Dannon, E.A. & Wydra, K. (2004). Interaction between silicon amendment, bacterial wilt development and phenotype of Ralstonia solanacearum in tomato genotypes. Physiological and Molecular Plant Pathology. DOI: 10.1016/j.pmpp.2004.09.006.

[20] Diogo, R.V.C. & Wydra, K. (2007). Silicon-induced basal resistance in tomato against Ralstonia solanacearum is related to modification of pectic cell wall polysaccharide structure. Physiological and Molecular Plant Pathology. DOI: 10.1016/j.pmpp.2007.07.008.

[21] Ghareeb, H. et al. (2011). Transcriptome of silicon-induced resistance against Ralstonia solanacearum in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect. Physiological and Molecular Plant Pathology. DOI: 10.1016/j.pmpp.2010.11.004.

[22] Addy et al. (2026). The Efficacy of Potassium Silicate and Bacteriophage in Controlling Bacterial Wilt of Tomato Caused by Ralstonia solanacearum in Indonesia. International Journal of Agriculture and Biosciences. DOI: 10.47278/journal.ijab/2026.212.