BIBLIOTECA DE SILICE

CAPÍTULO CT-NG

SOJA EN ARGENTINA

Argentina y ambientes de secano comparables

Silicio · ácido ortosilícico · nodulación · déficit hídrico · defensa · rendimiento

Documento técnico · Versión 2.0 · Multitransversalidad y protección multivía

Equipo Técnico I+D · NewGreen · Septiembre 2026

EL OBJETIVO NO ES SOLAMENTE QUE LA SOJA SOPORTE EL ESTRÉS. ES CONSEGUIR QUE UNA MAYOR PARTE DE SU POTENCIAL LLEGUE A VAINAS, SEMILLAS Y COSECHA CUANDO FALLAN EL AGUA, LA NODULACIÓN, LA ESTRUCTURA O LA DEFENSA.

Resumen ejecutivo

La soja argentina es un cultivo de secano a gran escala y su productividad cambia fuertemente con el ambiente. La campaña 2022/23, atravesada por una sequía histórica, terminó con una producción estimada cercana a 20,0 millones de toneladas, la más baja del siglo según GEA-BCR. Tres campañas después, 2025/26 cerró en torno a 51,5 millones de toneladas y 32,1 qq/ha, con lluvias estivales que llegaron en momentos clave. No es una comparación experimental —también cambian superficie, manejo y distribución regional—, pero dimensiona cuánto del resultado nacional depende de que el cultivo conserve funcionamiento cuando el ambiente acompaña poco (BCR, 2023; BCR-GEA, 2026).

En soja, el daño productivo no sigue una sola vía. La restricción hídrica puede reducir simultáneamente exploración radical, estado hídrico, apertura estomática, fotosíntesis, actividad de la simbiosis con Bradyrhizobium, fijación de vainas y llenado. El estrés oxidativo aumenta mientras disminuye la capacidad de sostener tejidos funcionales. Por eso, la pregunta técnica no es sólo si una herramienta 'ayuda contra la sequía', sino sobre cuántos de los procesos que construyen y preservan rendimiento existe evidencia de intervención.

La evidencia argentina específica aporta dos piezas importantes. Benvenuto y Osterrieth (2016) demostraron que la soja cultivada en la Pampa argentina incorpora y deposita silicio en distintos órganos durante el ciclo, con una producción estimada de silicofitolitos que pasó de 1,04 kg/ha en fase vegetativa a 25,12 kg/ha al inicio reproductivo y hasta 40,08 kg/ha hacia madurez. Ese estudio no fue una fertilización y no demuestra aumento de rendimiento; demuestra que el elemento forma parte real del ciclo del cultivo. Nápoles et al. (2009), con participación de INTA Pergamino y Rizobacter Argentina, mostraron además que el déficit de agua deteriora fuertemente la nodulación y el contenido de N. Ese trabajo tampoco estudió Si; define el problema fisiológico argentino que una tecnología transversal debe ser capaz de acompañar.

La evidencia directa de campo con ácido silícico estabilizado es contundente. Crusciol et al. (2013) trabajaron en soja cv. Embrapa 48 con un diseño en bloques y 14 repeticiones. El programa foliar totalizó 2,0 L/ha, dividido en V4, R1, R3 y R5. El Si foliar aumentó de 2,5 a 3,6 g/kg; la población, granos por vaina y masa de 100 granos no cambiaron; el número de vainas pasó de 45 a 50 por planta (+11%) y el rendimiento de 2.531 a 2.884 kg/ha, es decir +353 kg/ha y aproximadamente +14%. Es una cadena productiva limpia: más Si en tejido, más vainas y más grano.

Otros ensayos amplían esa lectura. Tripathi et al. (2021) encontraron durante dos años de campo mayor número y tamaño de nódulos, cambios favorables en arquitectura radical, fotosíntesis, conductancia estomática y rendimientos 21% y 19% superiores al control. Steiner et al. (2018) mostraron que la respuesta de nodulación y N depende del cultivar. Shwethakumari et al. (2021), durante dos años de lluvia contrastante, encontraron aumentos de rendimiento, proteína y aceite con ácido silícico foliar, pero la mejor combinación de dosis y número de aplicaciones cambió según variedad y disponibilidad de agua.

La multitransversalidad aparece cuando se agregan los demás frentes. Bajo déficit, Abdullah et al. (2025) documentaron mejor desarrollo radical, fotosíntesis y potencial hídrico y menor acumulación de marcadores de daño oxidativo. Franco et al. (2026) confirmaron que la formulación modifica la acumulación de Si y la respuesta de raíces, antioxidantes y vainas. Hussain et al. (2021) demostraron mayor lignificación y resistencia del tallo bajo baja radiación. Arsenault-Labrecque et al. (2012) mostraron que la respuesta frente a roya asiática dependió de la capacidad del cultivar para acumular Si. Devkar et al. (2025) identificaron, a nivel de célula individual, activación de genes vinculados con fitoalexinas, ácido salicílico y señalización inmune. Johnson et al. (2020) agregaron una vía frente a herbivoría: tres fuentes silicatadas redujeron 41-49% la tasa relativa de crecimiento de Helicoverpa punctigera.

La conclusión 2.0 es distinta de la versión anterior: el valor del silicio en soja no debe describirse como una única respuesta antiestrés. La evidencia muestra varias rutas fisiológicas, estructurales y defensivas que pueden converger sobre el mismo resultado final. A esto lo denominamos multitransversalidad fisiológica. Productivamente, esa multitransversalidad se transforma en protección multivía: distintas oportunidades de evitar que una parte del potencial se pierda antes de cosecha.

MULTITRANSVERSALIDAD FISIOLÓGICA = VARIAS VÍAS DE ACCIÓN. PROTECCIÓN MULTIVÍA = VARIAS OPORTUNIDADES DE EVITAR QUE EL POTENCIAL DEL CULTIVO SE PIERDA.

1. Soja argentina: el ambiente puede cambiar por completo el resultado

Argentina combina escala, secano y una elevada exposición interanual al clima. En la campaña 2022/23, GEA-BCR estimó una cosecha de soja de alrededor de 20,0 Mt, 53% menor que la campaña anterior y la más baja del siglo. La sequía fue parte de una secuencia de tres años con déficit de

lluvias, olas de calor y eventos térmicos adversos. La Bolsa de Comercio de Rosario estimó pérdidas muy elevadas para el conjunto soja-maíz-trigo, mostrando que el riesgo hídrico no es una abstracción fisiológica sino un determinante patrimonial para el productor (BCR, 2023).

La campaña 2025/26 mostró la otra cara. Con una superficie menor que el ciclo previo, la soja alcanzó aproximadamente 51,5 Mt y 32,1 qq/ha. La BCR atribuyó una parte importante de la recuperación a lluvias que llegaron en momentos clave, especialmente en regiones que venían de campañas limitadas por agua. Esta variabilidad no autoriza a explicar cada diferencia de rendimiento exclusivamente por precipitación, pero sí confirma el principio central: en soja argentina, conservar funcionamiento durante los momentos críticos tiene un valor productivo enorme (BCR-GEA, 2026).

EL PRODUCTOR NO CONTROLA CUÁNTO VA A LLOVER. SÍ PUEDE TRABAJAR SOBRE CUÁNTO DEL AMBIENTE DISPONIBLE LOGRA CONVERTIR LA PLANTA EN VAINAS Y SEMILLAS.

2. La variable final: cuántos kilogramos de semilla llegan a cosecha

En soja, el resultado comercial principal es el rendimiento de semilla por hectárea. Ese número es la integración de una cadena: plantas establecidas, ramas y nudos reproductivos, flores, vainas retenidas, semillas por vaina y peso final. La fisiología es relevante sólo en la medida en que explique por qué una parte de esa cadena se conserva o se pierde.

El ensayo de Crusciol et al. (2013) es especialmente instructivo porque separa los componentes. La aplicación de ácido silícico estabilizado no modificó la población final, el número de granos por vaina ni la masa de 100 granos. La diferencia se concentró en vainas por planta. Es decir, el rendimiento no aumentó por 'hacer todo un poco mejor'; apareció una respuesta específica en el componente reproductivo que más cambió.

Esta forma de leer los ensayos debe mantenerse en toda la Colección. Un aumento de fotosíntesis no debe presentarse como toneladas. Un mayor número de nódulos no debe contarse como rendimiento hasta que exista cosecha. Pero cuando un ensayo conecta mecanismo y resultado —como nódulos + raíces + fotosíntesis + rendimiento, o Si en hoja + vainas + rendimiento— la cadena causal gana mucho peso.

FORTALECER LA FISIOLOGÍA NO ES EL OBJETIVO FINAL. EL OBJETIVO ES QUE UNA MAYOR PARTE DEL POTENCIAL TERMINE COMO SOJA COSECHABLE.

3. La fisiología que sí importa: raíz, nódulo, hoja y reproducción

La fisiología necesaria para interpretar soja puede resumirse sin convertir el capítulo en una clase. Primero, la raíz debe explorar suelo y sostener absorción de agua y nutrientes. Segundo, la simbiosis con Bradyrhizobium debe mantener nódulos funcionales y abastecimiento de N. Tercero, la hoja debe conservar suficiente estado hídrico e intercambio gaseoso para sostener fotosíntesis. Cuarto, la planta

debe limitar el daño oxidativo asociado al estrés. Finalmente, esa capacidad debe llegar a floración, fijación de vainas y llenado.

Cuando el agua falta, esos procesos no se deterioran de manera independiente. Nápoles et al. (2009) mostraron que la nodulación cae fuertemente cuando disminuye la humedad del suelo. En su condición de mayor estrés, el inoculante no inducido cayó a 1,8 nódulos por planta, mientras tratamientos con genisteína conservaron niveles mayores. El objetivo de citar este trabajo no es atribuirle ningún efecto de Si; es demostrar que en soja el problema hídrico y el problema simbiótico se superponen.

Por eso, una herramienta que actúe sobre raíces, relaciones hídricas, fotosíntesis, antioxidantes y nodulación posee una lógica distinta de una herramienta enfocada en una sola variable. La planta no vive esos procesos como compartimentos separados; los integra en el mismo intento de sostener reproducción.

EN SOJA, AGUA Y NITRÓGENO NO SON DOS HISTORIAS SEPARADAS: RAÍCES, NÓDULOS Y CANOPIA FORMAN UN MISMO SISTEMA PRODUCTIVO.

4. Argentina: la soja incorpora y recicla silicio

Benvenuto y Osterrieth (2016), de la Universidad Nacional de Mar del Plata y CONICET, estudiaron soja cultivada en la Pampa argentina y realizaron el primer reporte específico de silicofitolitos en la especie. Identificaron depósitos en hojas, tallos, ramas, flores y vainas, además de depósitos de sílice en tejidos radicales.

La producción estimada de silicofitolitos aumentó con el ciclo: 1,04 kg/ha en fase vegetativa, 25,12 kg/ha al inicio de floración y hasta 40,08 kg/ha hacia madurez considerando biomasa foliar. La cifra no representa una necesidad de fertilización ni una dosis recomendada. Representa incorporación, transporte y depósito del elemento dentro de soja cultivada en condiciones argentinas.

Ese punto parece básico, pero resuelve una discusión importante. La soja es una dicotiledónea de menor acumulación que las gramíneas, pero no es fisiológicamente indiferente al Si. Su capacidad de incorporación existe y, como muestran trabajos posteriores, varía entre cultivares y según la fuente disponible.

LA SOJA ARGENTINA YA PARTICIPA DEL CICLO DEL SILICIO. LA PREGUNTA AGRONÓMICA ES CUÁNTO SI DISPONIBLE PUEDE INCORPORAR Y QUÉ CAMBIA CUANDO ESA DISPONIBILIDAD AUMENTA.

5. Ácido silícico estabilizado: una prueba directa de campo con 14 repeticiones

Crusciol, Soratto, Castro, Costa y Ferrari Neto (2013), desde UNESP y Embrapa, realizaron uno de los ensayos más útiles para este capítulo. La soja cv. Embrapa 48 se cultivó a campo en Botucatu, Brasil. El diseño fue en bloques al azar con 14 repeticiones, una repetición experimental elevada para un ensayo agronómico de campo.

El tratamiento foliar utilizó 2,0 L/ha de una formulación con 0,8% de Si soluble como concentrado estabilizado de ácido silícico, divididos en cuatro aplicaciones de 0,5 L/ha en V4, R1, R3 y R5. Los autores describen la fuente como una formulación que forma ácido ortosilícico [Si(OH)4] y ácido disilícico al diluirse. Esta precisión importa: se trata de evidencia de una fuente soluble estabilizada, no de un silicato mineral aplicado al suelo.

El contenido foliar de Si pasó de 2,5 g/kg en el control a 3,6 g/kg con el tratamiento. Ningún macronutriente foliar mostró una diferencia significativa atribuible al programa. La población final fue prácticamente idéntica. Tampoco cambiaron significativamente los granos por vaina ni la masa de 100 granos.

El cambio se concentró en el número de vainas: 45 por planta en el control y 50 con Si, aproximadamente +11%. Ese aumento se reflejó en el rendimiento: 2.531 kg/ha frente a 2.884 kg/ha, una diferencia de 353 kg/ha y cerca de +14%. La significancia estadística del rendimiento fue alta.

Variable	Control	Ácido silícico estabilizado	Lectura
Si foliar	2,5 g/kg	3,6 g/kg	La fuente elevó Si en tejido.
Plantas/ha	248.150	247.790	Sin cambio significativo.
Vainas/planta	45	50	≈ +11%; componente que respondió.
Granos/vaina	1,9	1,9	Sin cambio significativo.
Masa 100 granos	16,5 g	16,9 g	Sin cambio significativo.
Rendimiento	2.531 kg/ha	2.884 kg/ha	+353 kg/ha; ≈ +14%.

El valor científico del ensayo no está sólo en el porcentaje final. Está en la claridad de la respuesta. Al no cambiar población, granos por vaina ni peso de grano, la explicación productiva se concentra en una mayor retención/formación de vainas. Además, el aumento de Si foliar demuestra que la formulación entregó efectivamente el elemento al cultivo.

EN ESTE ENSAYO, LA CADENA FUE CONCRETA: MÁS SI EN HOJA → MÁS VAINAS → MÁS RENDIMIENTO.

6. El momento de disponibilidad también forma parte de la tecnología

El programa de Crusciol et al. (2013) no concentró todo el suministro en una sola aplicación. Cubrió V4, inicio de floración, inicio de fructificación e inicio de formación de semilla. No puede concluirse que esos cuatro momentos sean la receta óptima universal, porque el ensayo no comparó calendarios entre sí. Pero sí demuestra que la respuesta productiva se obtuvo manteniendo disponibilidad a lo largo de una secuencia que atraviesa crecimiento y reproducción.

La evidencia de India refuerza el principio. Shwethakumari et al. (2021) evaluaron dos variedades con distinta duración durante 2016 y 2017, años con disponibilidad de lluvia contrastante. Compararon ácido silícico a 2 y 4 mL/L con dos o tres aplicaciones. Las mejores combinaciones no fueron iguales para ambos materiales ni para ambos años.

La variedad de ciclo corto KBS-23 respondió especialmente bien en el año de menor precipitación con dos aplicaciones de 4 mL/L. La variedad de ciclo largo MAUS-2 mostró su mejor desempeño en el

segundo año, de mayor disponibilidad hídrica, con tres aplicaciones de 2 mL/L. Los autores encontraron mejoras significativas en rendimiento y variables de calidad, además de cambios en absorción de nutrientes.

LA RESPUESTA NO DEPENDE SÓLO DE QUÉ FUENTE SE APLICA. DEPENDE TAMBIÉN DE GENOTIPO, AMBIENTE, DOSIS Y MOMENTO.

7. Dos campañas con ácido silícico: rendimiento, proteína y aceite

El trabajo de Shwethakumari et al. (2021) merece un bloque propio porque muestra una respuesta de campo durante dos campañas y llega más allá del rendimiento bruto. El ácido silícico foliar modificó producción de semilla, rendimiento de aceite, rendimiento de proteína y acumulación de Si y otros nutrientes en distintas fracciones de la planta.

En MAUS-2, tres aplicaciones de 2 mL/L elevaron el rendimiento de aceite desde 202 a 420 kg/ha en 2016 y desde 579 a 822 kg/ha en 2017. En KBS-23, dos aplicaciones de 4 mL/L alcanzaron 338 y 534 kg/ha de aceite en 2016 y 2017, respectivamente. Las correlaciones entre absorción de Si y rendimiento de aceite fueron altas en ambos materiales ($r \approx 0,92$ y 0,85).

Estas cifras no deben trasladarse a Argentina como expectativa de porcentaje. Las variedades, clima, suelo, manejo y formulación son diferentes. Su utilidad es demostrar que la respuesta a ácido silícico puede llegar a la semilla y a sus componentes de calidad, y que la dirección y magnitud dependen del ambiente.

En soja argentina destinada mayoritariamente a industria, una modificación de proteína o aceite sólo tiene valor económico adicional si la cadena comercial realmente la remunera. Esa monetización pertenece al Dossier Económico. Técnicamente, lo importante aquí es que la evidencia productiva no se limita a biomasa.

EN SOJA, UNA RESPUESTA FISIOLÓGICA ES MÁS VALIOSA CUANDO LLEGA A VAINAS, SEMILLA Y COMPOSICIÓN, NO CUANDO SE QUEDA EN UNA HOJA MÁS VERDE.

8. Nodulación y fijación biológica de N: una vía específica de esta leguminosa

La elevada demanda de N de la soja convierte la simbiosis con Bradyrhizobium en un componente productivo central. Por eso, los resultados de Si sobre nodulación tienen una relevancia distinta a la que tendrían en un cereal.

Steiner, Zuffo, Busch y Santos (2018) evaluaron silicato de calcio y magnesio en dos cultivares bajo invernadero. La respuesta no fue idéntica entre genotipos: el número de nódulos aumentó de forma significativa en uno de ellos, mientras el tamaño de nódulo, clorofila y concentración foliar de N mejoraron en ambos. En la versión cuantitativa del trabajo, el aumento de número de nódulos alcanzó alrededor de 82% en el material respondedor, el tamaño de nódulo aumentó en ambos cultivares y el N foliar se elevó aproximadamente 10-18%.

Tripathi, Na y Kim (2021) llevaron la pregunta a campo durante dos temporadas. El programa combinó una fuente de Si incorporada al suelo al momento de siembra con metasilicato de sodio foliar en V5. Los tratamientos aumentaron número y tamaño de nódulos, modificaron rasgos de arquitectura radical y elevaron fotosíntesis neta, transpiración y conductancia estomática.

La respuesta terminó en cosecha: los rendimientos fueron 21% y 19% superiores al control en 2018 y 2019. El diseño no permite atribuir el resultado exclusivamente a una sola vía, porque raíces, nódulos e intercambio gaseoso mejoraron al mismo tiempo. Precisamente por eso el estudio es central para el concepto de multitransversalidad.

EN SOJA, MEJORAR RAÍCES SIN MIRAR NÓDULOS DEJA MEDIA HISTORIA FUERA. Y MEJORAR NÓDULOS SIN LLEGAR A COSECHA DEJA LA HISTORIA INCOMPLETA.

9. Déficit hídrico: la respuesta comienza bajo tierra

Abdullah et al. (2025) evaluaron soja a 85% y 50% de capacidad de campo con cuatro niveles de Si aplicado al suelo. El déficit redujo altura, área foliar, potencial hídrico, fotosíntesis, clorofilas, conductancia estomática y varios rasgos radicales. El tratamiento intermedio de Si fue el de mejor respuesta global.

Bajo sequía, el Si aumentó aproximadamente 39% la longitud radical, 23% la fotosíntesis y 17% el potencial hídrico respecto del cultivo estresado sin Si. Al mismo tiempo, redujo 21% el malondialdehído y 10% el peróxido de hidrógeno, mientras aumentaron proteínas solubles, fenoles y actividades antioxidantes.

La lectura productiva no es que el Si 'fabrique agua'. Bajo la misma restricción, la planta conservó mejor rasgos que determinan acceso al suelo, estado hídrico, intercambio gaseoso e integridad celular. Es una protección de funcionamiento, no una sustitución de lluvia.

Este trabajo fue realizado bajo condiciones controladas y con dosis altas de una fuente al suelo; no define el programa foliar que debe usar un productor argentino. Su valor es mecanístico: demuestra que raíces, agua, fotosíntesis y estrés oxidativo pueden responder al mismo elemento dentro del mismo sistema experimental.

BAJO DÉFICIT, EL SI NO ELIMINA LA RESTRICCIÓN. PUEDE REDUCIR CUÁNTO FUNCIONAMIENTO PIERDE LA PLANTA A CAUSA DE ELLA.

10. Formulación bajo sequía: no todas las fuentes producen la misma respuesta

Franco et al. (2026), con participación de USP, ESALQ/USP, UNESP y UFMS, compararon un silicato de potasio convencional con una formulación de silicato estabilizada con sorbitol, bajo 80% y 40% de capacidad de campo. Los autores estandarizaron el aporte de K y ajustaron las soluciones antes de aplicación, reduciendo un factor de confusión importante.

La formulación estabilizada aumentó la acumulación de Si en tejido y mejoró parámetros como área foliar, desarrollo radical y número de vainas, además de modificar compuestos antioxidantes y metabolismo de aminoácidos. El trabajo refuerza una idea que aparece repetidamente en soja: la concentración nominal de Si no predice por sí sola la respuesta.

También ayuda a evitar un error editorial. Una mejora fisiológica no debe convertirse automáticamente en promesa de rendimiento. El trabajo se utiliza aquí para demostrar sensibilidad a la formulación y convergencia sobre raíces, antioxidantes y componentes reproductivos; no para adjudicarle un porcentaje comercial que el experimento no estableció para Argentina.

MISMO ELEMENTO NO SIGNIFICA MISMA ENTREGA. Y MISMA CANTIDAD DECLARADA NO SIGNIFICA MISMA ACUMULACIÓN EN EL CULTIVO.

11. Estructura: lignificación y resistencia del tallo

La soja también puede perder potencial por una vía estructural. El sombreo intenso y determinados sistemas de alta densidad o intersiembra pueden favorecer elongación, menor lignificación y debilidad de tallos. Hussain et al. (2021) evaluaron Si foliar bajo condiciones de luz y sombra para estudiar precisamente esa vulnerabilidad.

A 200 mg/kg de Si, la fotosíntesis neta aumentó 46,4% en condición de luz y 33,3% bajo sombra. Al mismo tiempo aumentaron actividades de PAL, 4CL, CAD y peroxidasa, enzimas asociadas a la biosíntesis de lignina. El tejido acumuló más lignina, aumentó la resistencia a flexión del tallo y disminuyó la susceptibilidad al vuelco.

Este resultado amplía la interpretación del Si más allá del balance hídrico. La misma intervención modificó pared celular, metabolismo de lignina, estabilidad mecánica y fotosíntesis. No todas esas respuestas terminarán siendo relevantes en todos los sistemas argentinos, pero demuestran que la multitransversalidad incluye una dimensión física del cultivo.

FORTALECER EL TALLO NO ES UNA MEJORA ESTÉTICA. CUANDO EL VUELCO APARECE, LA ESTRUCTURA TAMBIÉN SE CONVIERTE EN UNA VÍA DE PÉRDIDA DE RENDIMIENTO Y COSECHABILIDAD.

12. Roya asiática: el beneficio depende de que el cultivar acumule Si

Arsenault-Labrecque, Menzies y Bélanger (2012) estudiaron la interacción entre Si y Phakopsora pachyrhizi, agente causal de la roya asiática. El experimento es particularmente valioso porque no obtuvo una respuesta universal y explica por qué.

El cultivar Williams 82 no aumentó significativamente su contenido de Si al recibir el tratamiento y tampoco mostró un control relevante de la enfermedad. En cambio, el cultivar coreano Hikmok sorip acumuló casi cuatro veces más Si que Williams 82 y, cuando recibió Si, presentó una casi ausencia de síntomas. Los autores relacionaron la resistencia con reacciones hipersensibles inducidas.

El mensaje no es que Si sea un fungicida. El mensaje es más preciso: cuando la planta logra incorporar suficiente Si, el elemento puede participar en mecanismos de resistencia mediada por el hospedero; cuando no lo incorpora, el beneficio puede desaparecer. Es una demostración muy clara de interacción genotipo × absorción × respuesta.

EL SI NO REEMPLAZA EL FUNGICIDA POR DEFINICIÓN. PUEDE MODIFICAR LA VULNERABILIDAD DEL HOSPEDERO, Y ESA RESPUESTA DEPENDE DE QUE EL CULTIVAR REALMENTE ACUMULE EL ELEMENTO.

13. Defensa molecular: la soja responde al Si a nivel de células y genes

La investigación de Devkar et al. (2025) agrega una capa que no existía cuando se desarrollaron los primeros capítulos de la Colección. Mediante secuenciación de ARN de núcleo único, el equipo caracterizó la respuesta de diferentes tipos celulares de hojas de soja al tratamiento con Si.

Se identificó un grupo celular asociado específicamente al tratamiento dentro de tejidos vasculares y una fuerte inducción de genes relacionados con defensa. Entre las rutas moduladas aparecieron biosíntesis de fitoalexinas, metabolismo y señalización de ácido salicílico, receptores inmunes y procesos de interacción planta-patógeno. Los autores validaron además componentes del transporte de Si mediante ensayos funcionales y edición génica.

Esto no demuestra por sí solo una reducción de una enfermedad específica a campo. Su valor es mecanístico: muestra que la relación Si-defensa no se limita a una barrera física de sílice. En soja existen respuestas celulares y transcripcionales compatibles con priming y activación inmune.

LA DEFENSA ASOCIADA AL SI NO ES SÓLO UNA PARED MÁS DURA. EN SOJA EXISTE EVIDENCIA DE REPROGRAMACIÓN MOLECULAR DE RUTAS DE INMUNIDAD.

14. Herbivoría: otra vía defensiva independiente

Johnson, Rowe y Hall (2020), de Western Sydney University, estudiaron soja suplementada con silicatos de potasio, sodio o calcio frente a Helicoverpa punctigera. Tanto la suplementación como el ataque aumentaron la concentración de Si foliar, y la herbivoría indujo aproximadamente 19% más acumulación relativa de Si.

Las tres fuentes redujeron de manera similar la tasa relativa de crecimiento de las larvas: aproximadamente -41% con silicato de potasio, -49% con silicato de sodio y -48% con silicato de calcio. Además, existió una correlación negativa fuerte entre Si acumulado en hoja y crecimiento del insecto.

Nuevamente, la lectura correcta no es retirar insecticidas. El estudio no reemplaza monitoreo ni umbrales de decisión. Demuestra una ruta adicional de defensa vegetal que puede modificar la interacción cultivo-herbívoro y que forma parte del espectro multivía.

UNA PLAGA NO NECESITA DESAPARECER PARA QUE UNA MENOR VULNERABILIDAD TENGA VALOR. PERO LA DECISIÓN FITOSANITARIA SIGUE DEPENDIENDO DE MONITOREO Y UMBRAL.

15. La fuente importa: evidencia subtropical de campo publicada en 2026

Soares Wenneck et al. (2026) compararon cinco tratamientos con distintas fuentes de Si foliar durante la fase reproductiva de soja en el sur de Brasil. El ensayo es muy útil porque fue realizado a campo bajo clima subtropical y demuestra que diferentes formulaciones no producen el mismo patrón de acumulación.

El silicato de potasio generó la mayor concentración foliar de Si; el óxido de silicio produjo la mayor concentración en semilla; un termofosfato con Si se asoció al mayor rendimiento. Sin embargo, los propios autores advierten que el termofosfato también aportó otros nutrientes, especialmente P y Ca, por lo que su respuesta productiva no puede adjudicarse exclusivamente al Si.

La concentración de Si en semilla mostró la asociación más fuerte con rendimiento, con r ≈ 0,88, y las concentraciones foliares también se correlacionaron positivamente. Pero ninguna fuente maximizó simultáneamente Si en hoja, Si en semilla y rendimiento.

La conclusión es mucho más útil que elegir un 'ganador': la eficiencia agronómica depende de formulación, disolución, tamaño de partícula, estabilidad y disponibilidad para absorción. Medir sólo Si total de un producto es insuficiente para predecir respuesta.

NO TODAS LAS FUENTES DE SILICIO SON AGRONÓMICAMENTE EQUIVALENTES. LA FORMULACIÓN DEFINE CUÁNTO DEL ELEMENTO LLEGA A LA PLANTA Y CÓMO SE DISTRIBUYE.

16. Biodisponibilidad: silicio total no equivale a silicio absorbible

El Si es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, pero la planta no absorbe minerales silicatados completos ni 'silicio total'. La forma soluble predominante de ingreso es el ácido monosilícico u ortosilícico, H_4SiO_4. La literatura clásica sobre transporte de Si y los propios trabajos agronómicos utilizados en este capítulo coinciden en esa forma de absorción.

Por eso, dos productos que declaran la misma cantidad total de Si pueden producir disponibilidades completamente diferentes. Una fuente mineral poco soluble puede funcionar cuando se aplica en gran cantidad y dispone de tiempo, humedad y condiciones químicas para liberar Si; una formulación soluble puede buscar eficiencia con una carga material mucho menor. No son tecnologías idénticas y no deben compararse sólo por porcentaje de etiqueta.

La evidencia de Crusciol et al. (2013) es importante precisamente por esto: una cantidad relativamente pequeña de Si soluble aplicada foliarmente elevó el Si del tejido y produjo una respuesta productiva. La evidencia de Soares Wenneck et al. (2026) agrega que incluso entre fuentes foliares la acumulación cambia.

NO SE TRATA DE APLICAR MÁS SILICIO. SE TRATA DE CONSEGUIR QUE UNA FRACCIÓN EFECTIVA LLEGUE A LA PLANTA EN FORMA DISPONIBLE Y EN EL MOMENTO EN QUE PUEDE UTILIZARLA.

17. Fuentes tradicionales y ácido ortosilícico: fundamento y evolución de eficiencia

La bibliografía de soja utiliza fuentes muy distintas: silicatos de calcio y magnesio al suelo, metasilicato de sodio, silicatos de potasio, formulaciones estabilizadas, ácido silícico foliar y otros materiales. Sería incorrecto enfrentar esa evidencia como si una fuente invalidara a las demás.

Las fuentes tradicionales demostraron que el Si puede modificar nodulación, raíces, defensa, estructura y rendimiento. Esa evidencia constituye el fundamento agronómico del elemento. Las tecnologías de ácido silícico/ortosilícico agregan una pregunta diferente: si la planta utiliza H_4SiO_4, ¿es posible conseguir respuesta productiva entregando el elemento en una forma soluble y con menor carga material?

En soja, la respuesta de Crusciol et al. (2013) permite contestar afirmativamente para una formulación estabilizada que forma ácido ortosilícico al diluirse: 14 repeticiones, cuatro aplicaciones foliares y +353 kg/ha. Shwethakumari et al. (2021) agrega dos campañas con ácido silícico foliar y respuestas sobre rendimiento, proteína y aceite.

Eso no significa que cualquier producto etiquetado como 'ácido ortosilícico' sea equivalente. La estabilidad de la forma monomérica, pH, concentración real, presencia de polímeros, formulación y capacidad de llegar a tejido siguen siendo variables esenciales. El principio tecnológico es eficiencia de entrega, no una etiqueta comercial.

LAS FUENTES TRADICIONALES DEMOSTRARON QUE EL SILICIO PUEDE FUNCIONAR. LA EVIDENCIA CON ÁCIDO SILÍCICO/ORTOSILÍCICO DEMUESTRA QUE TAMBIÉN ES POSIBLE OBTENER RESPUESTAS CON ESTRATEGIAS DE ALTA EFICIENCIA DE ENTREGA.

18. Multitransversalidad fisiológica: varias vías dentro de la misma planta

Después de separar los estudios por mecanismo, conviene volver a integrarlos. La raíz, el nódulo, la hoja, el tallo y la defensa no son cinco cultivos diferentes. Son partes de la misma soja. Una restricción importante puede deteriorar varias simultáneamente; una intervención transversal puede influir en más de una al mismo tiempo.

A esto llamamos multitransversalidad fisiológica: una misma estrategia posee evidencia sobre diferentes procesos que construyen o preservan rendimiento. El concepto no autoriza a sumar porcentajes como si fueran beneficios independientes. Si una raíz más funcional y una fotosíntesis mejor conservada terminan explicando las mismas 300 kg/ha de semilla preservada, existen 300 kg/ha, no dos beneficios monetizables.

Su valor está en otra parte: una inversión fisiológica transversal depende menos de que una sola ruta sea la que limite ese año. En una campaña puede expresarse principalmente por agua y estrés

oxidativo; en otra por fijación de vainas; en otra por nodulación; en otra por estructura o menor vulnerabilidad biótica.

Vía de pérdida	Qué puede comprometer	Evidencia de Si en soja
Raíces	Exploración de suelo, acceso a agua y nutrientes.	Tripathi 2021; Abdullah 2025; Franco 2026.
Nodulación / N	Fijación biológica y abastecimiento nitrogenado.	Steiner 2018; Tripathi 2021.
Déficit hídrico	Estado hídrico, estomas, fotosíntesis.	Abdullah 2025; Franco 2026.
Estrés oxidativo	Membranas y tejido funcional.	Abdullah 2025; Franco 2026.
Reproducción	Flores/vainas que no llegan a semilla.	Crusciol 2013: +11% vainas; +353 kg/ha.
Estructura	Vuelco y cosechabilidad.	Hussain 2021: lignificación y resistencia.
Patógenos	Daño sanitario y pérdida de tejido.	Arsenault-Labrecque 2012; Devkar 2025.
Herbívoros	Consumo de área y asimilados.	Johnson 2020: menor crecimiento larval.
Calidad de semilla	Proteína y aceite.	Shwethakumari 2021.
Disponibilidad de Si	Que el elemento no llegue al tejido.	Benvenuto 2016; Soares Wenneck 2026.

MULTITRANSVERSALIDAD NO SIGNIFICA HACER DIEZ PROMESAS. SIGNIFICA QUE LA MISMA HERRAMIENTA TIENE EVIDENCIA SOBRE VARIOS PUNTOS DONDE EL CULTIVO PUEDE PERDER POTENCIAL.

19. Protección multivía: la traducción productiva de la multitransversalidad

La multitransversalidad describe cómo puede actuar la herramienta. La protección multivía describe qué significa eso para el lote: existen varias rutas por las que el cultivo puede perder rendimiento y varias oportunidades para conservarlo.

Un año con buen abastecimiento hídrico puede mostrar poco valor por la vía de sequía y, sin embargo, expresar una respuesta reproductiva. Un año seco puede no superar el potencial de una campaña ideal, pero una menor penalización puede ser económicamente más importante que un aumento observado bajo condiciones óptimas. Una campaña con presión biótica puede hacer visible la vía defensiva; otra, una diferencia de estructura o nodulación.

Esta lógica no convierte al Si en sustituto universal. El inoculante sigue teniendo una función específica; un fungicida sigue siendo necesario cuando la enfermedad y el umbral lo exigen; un insecticida no debe eliminarse por principio; la fertilización que corrige una deficiencia real no es redundante. La protección multivía sirve para integrar una herramienta transversal dentro de un programa, no para borrar herramientas específicas.

La capa económica —cuántos kilogramos se preservan, qué intervenciones se racionalizan y cuánto cuesta el programa incremental— debe calcularse en el Dossier Económico. La capa técnica de este capítulo explica por qué existe más de una vía plausible de retorno.

MULTITRANSVERSALIDAD FISIOLÓGICA EXPLICA EL CÓMO. PROTECCIÓN MULTIVÍA EXPLICA EL PARA QUÉ.

20. Qué significa para la soja argentina

La soja argentina ofrece un caso especialmente lógico para evaluar una estrategia transversal. Es mayoritariamente de secano, depende fuertemente de la fijación biológica de N, atraviesa períodos reproductivos sensibles al agua y está expuesta a presiones sanitarias y ambientales que varían entre regiones y campañas.

La evidencia local demuestra incorporación de Si y confirma que agua y nodulación forman parte del mismo problema fisiológico. La evidencia de campo internacional demuestra que el suministro de Si puede llegar a cosecha. Con una fuente estabilizada de ácido silícico, Crusciol et al. (2013) obtuvieron +353 kg/ha con una respuesta concentrada en vainas. Tripathi et al. (2021) conectaron nódulos, raíces, fotosíntesis y rendimiento durante dos años. Shwethakumari et al. (2021) mostró que ácido silícico foliar puede modificar semilla, proteína y aceite bajo años de lluvia diferente.

La evidencia mecanística amplía el argumento: raíces y estado hídrico bajo sequía, antioxidantes, lignificación, inmunidad molecular, respuesta frente a roya y herbivoría. No todos esos frentes estarán activos a la vez. Precisamente por eso el valor no debe buscarse en un porcentaje promedio universal.

Para una validación argentina moderna, el indicador principal debe ser rendimiento corregido y componentes de rendimiento. Conviene agregar Si en tejido, número y masa de nódulos, N foliar, vainas por planta, granos por vaina, peso de 100/1000 semillas, una caracterización simple del agua disponible y registro de los principales eventos bióticos y abióticos. Así no sólo se sabrá si hubo respuesta; se podrá entender de dónde vino.

El diseño debe incluir un control sin Si, replicación suficiente y, cuando se comparen formulaciones, controles que eviten adjudicar al Si efectos de K, Ca, P u otros nutrientes acompañantes. En ensayos foliares, medir Si en tejido es especialmente valioso porque confirma que la fuente realmente aumentó la disponibilidad para la planta.

ARGENTINA NO NECESITA COPIAR UNA DOSIS EXTRANJERA. NECESITA VALIDAR LOCALMENTE UNA HIPÓTESIS QUE YA TIENE UNA BASE CIENTÍFICA FUERTE: PROTEGER VARIOS PROCESOS PARA QUE MÁS POTENCIAL LLEGUE A COSECHA.

21. Resultados cuantificados seleccionados

Evidencia	Condición	Fuente/estrategia	Resultado principal	Lectura
Argentina · Benvenuto & Osterrieth 2016	Pampa argentina	Sin fertilización experimental	1,04 → 25,12 → hasta 40,08 kg/ha de silicofitolitos	Demuestra incorporación y reciclaje local de Si.
Brasil · Crusciol et al. 2013	Campo · 14 repeticiones	Ácido silícico estabilizado foliar · 2 L/ha total	45→50 vainas/planta; 2.531→2.884 kg/ha (+353; ≈+14%)	Evidencia directa de tejido, vainas y rendimiento.
Corea · Tripathi et al. 2021	Campo · 2 años	Si suelo + foliar	Rendimiento +21% y +19%; más/mayores nódulos	Conecta raíces, simbiosis, fotosíntesis y cosecha.

Evidencia	Condición	Fuente/estrategia	Resultado principal	Lectura
India · Shwethakumari et al. 2021	Campo · 2 años de lluvia contrastante	Ácido silícico foliar	Mayor rendimiento, proteína y aceite; respuesta dependiente de cultivar/lluvia	AOS/ácido silícico llega a variables comerciales.
Steiner et al. 2018	Invernadero · 2 cultivares	Silicato Ca-Mg	Nodulación y N foliar; magnitud dependiente de genotipo	Evidencia específica sobre simbiosis.
Abdullah et al. 2025	50% capacidad de campo	Si al suelo	Raíz +39%; fotosíntesis +23%; potencial hídrico +17%; MDA -21%	Convergencia radical, hídrica y antioxidante.
Hussain et al. 2021	Baja radiación	Si foliar	Más lignina y resistencia; fotosíntesis +33,3% bajo sombra a dosis seleccionada	Vía estructural independiente.
Arsenault-Labrecque et al. 2012	Roya asiática	Si hidropónico	Respuesta sanitaria fuerte sólo en cultivar que acumuló Si	Genotipo y absorción condicionan el beneficio.
Johnson et al. 2020	Herbivoría	Tres silicatos	Crecimiento larval -41 a -49%	Vía de defensa frente a herbívoros.
Soares Wenneck et al. 2026	Campo subtropical	Cinco fuentes foliares	Si semilla-rendimiento r≈0,88; fuentes no equivalentes	La formulación condiciona acumulación y desempeño.

22. Preguntas para el asesor técnico

- ¿Cuál es el historial de déficit hídrico del lote y en qué etapas suele concentrarse la mayor pérdida de potencial?
- ¿Qué agua útil existe en el perfil al inicio y qué restricciones físicas pueden limitar la exploración radical?
- ¿Qué cultivar o grupo de madurez se utiliza y qué antecedentes tiene frente a estrés, vuelco y enfermedades?
- ¿Cómo se comporta habitualmente la nodulación: número, tamaño, distribución y actividad aparente de los nódulos?
- ¿Qué inoculante y cepas de Bradyrhizobium se utilizan y cómo se maneja la calidad de inoculación?
- ¿El objetivo principal del programa es estabilidad de rendimiento, fijación de vainas, protección frente a déficit, calidad de semilla o una combinación?
- ¿Qué fuente de Si se pretende utilizar, cuál es su forma química y qué evidencia existe sobre solubilidad, estabilidad y absorción?
- ¿El producto entrega una forma de Si directamente disponible o depende de procesos previos de solubilización?
- ¿La formulación aporta K, Ca, P u otros componentes que deban separarse del efecto del Si al interpretar un ensayo?

- ¿Los momentos de aplicación cubren etapas vegetativas y reproductivas relevantes o se concentran en una sola ventana?
- ¿Qué historial existe de roya, enfermedades foliares, herbívoros u otras contingencias que puedan convertir la defensa en una vía relevante?
- ¿El sistema presenta antecedentes de vuelco o debilidad de tallo por densidad, sombreo o arquitectura del cultivo?
- ¿La aplicación puede integrarse a pulverizaciones ya planificadas sin crear una pasada exclusiva?
- ¿El ensayo medirá Si en tejido, nodulación, N foliar, vainas, granos por vaina, peso de semilla y rendimiento además de variables fisiológicas?
- ¿Se mantendrá un control sin Si y suficiente replicación para separar señal agronómica de variabilidad del lote?

23. Conclusión

Soja Argentina 2.0 permite ir bastante más allá de la frase genérica 'el silicio ayuda frente a la sequía'. La evidencia científica disponible muestra respuestas en varios de los sistemas que determinan cuánto potencial termina convertido en cosecha: raíces, nodulación, estado nitrogenado, relaciones hídricas, fotosíntesis, metabolismo antioxidante, lignificación, señalización defensiva, interacción con patógenos y herbívoros, vainas, semilla, proteína y aceite.

La evidencia argentina confirma que la soja incorpora Si durante su ciclo y que la nodulación es vulnerable al déficit hídrico. La evidencia directa de campo con una formulación de ácido silícico estabilizado es especialmente contundente: 14 repeticiones, cuatro aplicaciones, aumento de Si foliar, +11% de vainas y +353 kg/ha, aproximadamente +14% de rendimiento. No es una promesa para Argentina; es una demostración experimental de que una fuente soluble y estabilizada puede mover un componente reproductivo y llevar la respuesta a cosecha.

La evidencia de dos campañas con ácido silícico foliar agrega proteína y aceite y muestra que la mejor estrategia depende de variedad y lluvia. Los ensayos de nodulación conectan la simbiosis con raíces, fotosíntesis y rendimiento. Los trabajos de sequía muestran conservación de funcionamiento radical, hídrico y antioxidante. La evidencia estructural y defensiva agrega rutas distintas de pérdida potencial.

Esta diversidad de respuestas no debe usarse para inflar el argumento. Debe usarse para hacerlo más preciso. No todos los mecanismos se expresan simultáneamente, no todas las fuentes son equivalentes y no todos los genotipos acumulan Si de la misma forma. La fuerza científica está en la convergencia de estudios independientes y en reconocer las condiciones bajo las cuales cada resultado fue obtenido.

Por eso, el concepto central no es 'más Si = más rendimiento'. El concepto es multitransversalidad fisiológica: la misma estrategia puede participar en distintos procesos relevantes dentro de la misma

planta. Su traducción agronómica es protección multivía: existen varias oportunidades para impedir que el potencial se escape antes de cosecha.

En la soja argentina de secano, donde el agua, la fijación biológica de N, la reproducción y la sanidad pueden convertirse en cuellos de botella en campañas diferentes, esa lógica merece validación local de alto nivel. La recomendación técnica correcta no es prometer un porcentaje universal; es diseñar programas y ensayos que permitan comprobar cuánta parte del potencial logra conservarse y por qué.

LA MULTITRANSVERSALIDAD DEL SILICIO NO CONSISTE EN SUMAR BENEFICIOS SOBRE EL PAPEL. CONSISTE EN PROTEGER, POR VARIAS VÍAS, LA MISMA MÁQUINA BIOLÓGICA QUE CONSTRUYE EL RENDIMIENTO.

Bibliografía

Abdullah, M. M.; Waraich, E. A.; Ahmad, M.; Hussain, S.; Asghar, H. N.; Haider, A.; Zulfiqar, U.; Ahmad, Z.; Soufan, W.; Prasad, P. V. V.; Djalovic, I. (2025). Improving soybean drought tolerance via silicon-induced changes in growth, physiological, biochemical, and root characteristics. Plant Signaling & Behavior, 20(1), 2465232. DOI: 10.1080/15592324.2025.2465232.

Arsenault-Labrecque, G.; Menzies, J. G.; Bélanger, R. R. (2012). Effect of Silicon Absorption on Soybean Resistance to Phakopsora pachyrhizi in Different Cultivars. Plant Disease, 96(1), 37-42. DOI: 10.1094/PDIS-05-11-0376.

Benvenuto, M. L.; Osterrieth, M. L. (2016). Silicophytoliths from soybean plants in different growth stages of the Argentine Pampas. Brazilian Journal of Botany, 39(1), 337-347. DOI: 10.1007/s40415-015-0212-4.

Bolsa de Comercio de Rosario - GEA (2023). Informes de campaña 2022/23 sobre producción de soja y efectos de la sequía. GEA-BCR, Rosario, Argentina.

Bolsa de Comercio de Rosario - GEA (2026). Balance regional de la soja 2025/26 y estimaciones nacionales de producción. Producción estimada 51,5 Mt; rendimiento nacional 32,1 qq/ha. GEA-BCR, Rosario, Argentina.

Crusciol, C. A. C.; Soratto, R. P.; Castro, G. S. A.; Costa, C. H. M.; Ferrari Neto, J. (2013). Foliar application of stabilized silicic acid on soybean, common bean, and peanut. Revista Ciência Agronômica, 44(2), 404-410. DOI: 10.1590/S1806-66902013000200025.

Devkar, V.; D'Agostino, L.; Kshetry, A. O.; Chen, Y.; Ghose, K.; Lenin, Y.-V.; Nadaf, A. B.; Thirumalaikumar, V. P.; Skirycz, A.; Sonah, H.; Ma, J.; Stupar, R. M.; Miller, A. J.; Herrera-Estrella, L.; Deshmukh, R.; Patil, G. B. (2025). Cell-type-specific response to silicon treatment in soybean leaves revealed by single-nucleus RNA sequencing and targeted gene editing. The Plant Journal, 123(1), e70309. DOI: 10.1111/tpj.70309.

Franco, F. S.; Souza Júnior, J. P.; Prado, R. M.; Costa, M. G.; Campos, C. N. S.; Berzaghi Junior, L. M.; Capucin, N. L.; Lopes, G. P.; Montanha, G. S.; Gomes, M. L. M.; Seron, A. C. S. C.; Carvalho,

H. W. P.; Lavres, J.; Umburanas, R. C. (2026). Sorbitol-Stabilized Silicon Formulation Improve Root Traits and Antioxidant Response in Drought-Stressed Soybean. Plants, 15(2), 197. DOI: 10.3390/plants15020197.

Hussain, S.; Li, S.; Mumtaz, M.; Shafiq, I.; Iqbal, N.; Brestič, M.; Shoaib, M.; Qin, S.; Li, W.; Xu, M.; Chen, B.; Živčák, M.; Rastogi, A.; Skalický, M.; Hejnák, V.; Liu, W.; Yang, W. (2021). Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (Glycine max (L.) Merr.). Journal of Hazardous Materials, 401, 123256. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123256.

Johnson, S. N.; Rowe, R. C.; Hall, C. R. (2020). Silicon is an inducible and effective herbivore defence against Helicoverpa punctigera (Lepidoptera: Noctuidae) in soybean. Bulletin of Entomological Research, 110(3), 417-422. DOI: 10.1017/S0007485319000798.

Ma, J. F.; Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends in Plant Science, 11(8), 392-397. DOI: 10.1016/j.tplants.2006.06.007.

Nápoles, M. C.; Guevara, E.; Montero, F.; Rossi, A.; Ferreira, A. (2009). Role of Bradyrhizobium japonicum induced by genistein on soybean stressed by water deficit. Spanish Journal of Agricultural Research, 7(3), 665-671. DOI: 10.5424/sjar/2009073-451.

Shwethakumari, U.; Pallavi, T.; Prakash, N. B. (2021). Influence of Foliar Silicic Acid Application on Soybean (Glycine max L.) Varieties Grown across Two Distinct Rainfall Years. Plants, 10(6), 1162. DOI: 10.3390/plants10061162.

Soares Wenneck, G.; Saath, R.; Rezende, R.; Santos, A. C.; Ramos, M. L. (2026). Foliar Silicon Sources Affect Silicon Accumulation in Tissues and Yield of Soybean Under Subtropical Conditions in Southern Brazil. Legumes, 1(1), 3. DOI: 10.3390/legumes1010003.

Steiner, F.; Zuffo, A. M.; Busch, A.; Santos, D. M. S. (2018). Silicate fertilization potentiates the nodule formation and symbiotic nitrogen fixation in soybean. Pesquisa Agropecuária Tropical, 48(3), 212-221. DOI: 10.1590/1983-40632018v4851472.

Tripathi, P.; Na, C.-I.; Kim, Y. (2021). Effect of silicon fertilizer treatment on nodule formation and yield in soybean (Glycine max L.). European Journal of Agronomy, 122, 126172. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126172.