



DEFICIENCIA Y FUNCIONALIDAD DEL SÍLICE EN SUELOS, COSECHAS Y ALIMENTOS

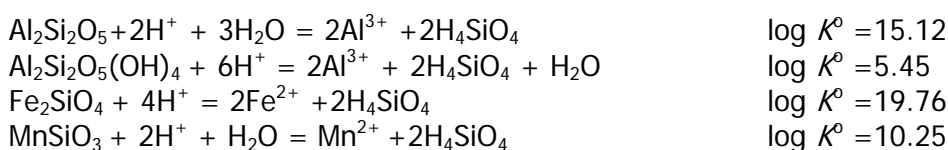
Matichenkov V.V.

Inst. of Basic Biological Problems RAS, Russia. E-mail: Vvmatichenkov@rambler.ru

El Si es el segundo elemento más abundante de la Tierra. Además de las formas inertes del Si (cuarzo, vidrio et al.), hay sustancias ricas en Si biogeoquímicamente activo presentes en la naturaleza. Hay ácido monosilícico, oligómeros de ácido silícico y ácidos polisilícicos. El silicio juega un papel distintivo y significativo en los procesos de formación del suelo, afectando a la fertilidad y la nutrición de las plantas [2, 6, 8]. La influencia positiva del sílice en el crecimiento y desarrollo de la planta ha sido conocida desde que Justius von Leibigh publicó en 1840 su trabajo sobre la nutrición mineral de las plantas. Comenzando en 1840, han sido numerosos los experimentos en laboratorios, invernaderos y en el campo que han mostrado beneficios de la fertilización con Si en la productividad de las cosechas de arroz (*Oryza sativa* L.) (15-100%), maíz (*Zea mays* L.) (15-35%), trigo (*Triticum aestivum* L.) (10-30%), cebada (*Hordeum vulgare* L.) (10-30%), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (15-40%), calabaza (*Cucumis sativus* L.) (10-40%), fresa (*Fragaria* spp.) (10-30%), cítricos (*Citrus* spp.) (5-15%), tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (10-40%), pastos (*Stenotaphrum secundatum* Kuntze, *Cynodon dactylon* L., *Lolium multiflorum* Lam, *Paspalum notatum* Fluegge) (10-25%), plátano (*Musa paradisiaca*) (20-40%) [6, 9].

El Silicio en el suelo

Los compuestos de silicio soluble, como el ácido monosilícico y el ácido polisilícico, afectan a muchas de las propiedades químicas y físico-químicas del suelo. El ácido monosilícico posee una elevada actividad química [3, 6]. El ácido monosilícico puede reaccionar con el aluminio, hierro y manganeso para la formación de silicatos ligeramente solubles [2, 6].



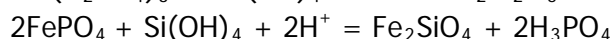
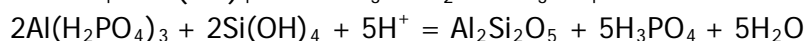
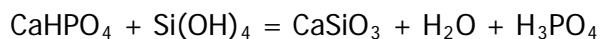
Bajo diferentes concentraciones el ácido monosilícico puede combinarse con metales pesados (Cd, Pb, Zn, Hg, y otros), formando compuestos complejos solubles si la concentración de ácido monosilícico es menor [6], y silicatos de metales pesados ligeramente solubles cuando la concentración de ácido monosilícico es mayor en el sistema [2]. De esta forma la aplicación de formas activas de Si ofrece la posibilidad de manejar la movilidad de metales pesados.



El Silicio puede jugar una parte prominente en los efectos del aluminio en los sistemas biológicos [5]. El mejoramiento significativo de la toxicidad del aluminio por silicio ha sido

registrado para diferentes grupos y en diferentes especies [3]. El mecanismo principal del efecto del silicio en la toxicidad del aluminio está probablemente conectado con la formación de complejos silicatos hidro-aluminosos no tóxicos [8, 9].

El anión del ácido monosilícico $[\text{Si}(\text{OH})_3]^-$ puede reemplazar el anión fosfato $[\text{HPO}_4]^{2-}$ del calcio, magnesio, aluminio y fosfatos de hierro [6].



Estas reacciones son seguidas por la desabsorción del anión-fosfato, lo que lleva al incremento de fósforo en la solución del suelo y mejora la nutrición de P de la planta por la aplicación de fertilizantes de Si. El máximo efecto puede esperarse en suelos alcalinos, como los calcáreos (Tabla 1).

Tabla 1.- Contenido de agua y P extraíbles en suelo calcáreo (provincia de Granada) antes y después de su incubación con ácido monosilícico (200 mg/l de Si)

Suelo, localización	Antes de incubación		Después de incubación	
	Extraíble en agua	Extraíble alcalino	Extraíble en agua	Extraíble alcalino
	-----P, mg/kg-----			
Calcáreo, Jordania	11.5	58.5	22.4	75.4
Calcáreo, Granada 1	2.2	20.8	13.6	49.7
Calcáreo, Granada 2	2.3	5.6	4.6	29.3

Las precipitaciones y el uso extensivo de irrigación y drenaje llevan a que un 20 a un 80% de los nutrientes y de sustancias químicas añadidas lixivien de un perfil de suelo arenoso. Las sustancias ricas en Si y biogeoquímicamente activas (fertilizantes de Si) muestran normalmente unas buenas propiedades de absorción [2, 9]. Como resultado este material puede fijar físicamente por adsorción físicamente P, N o K móviles y mantenerlos en una forma disponible para la planta [6].

Los ácidos polisilícicos son un componente integral de la solución del suelo. El ácido polisilícico tiene dos o más átomos de silicio. En el suelo, los ácidos polisilícicos afectan principalmente a las propiedades físicas. Los ácidos polisilícicos son capaces de ligar partículas de suelo. La formación de la estructura del suelo tiene lugar a través de la creación de puentes de silicio entre partículas [6]. Con el incremento de los ácidos polisilícicos, el grado de agregación del suelo, la capacidad de retención hídrica, la capacidad de intercambio y la capacidad tampón de suelos ligeros se incrementa.

La ausencia de métodos simples, universales e informativos para la clasificación de suelos según su deficiencia de silicio en formas activas y disponibles para las plantas tiene una gran influencia negativa en el uso práctico de fertilizantes de Si en el mundo. Han sido sugeridos varios métodos para determinar el Si disponible para las plantas en un medio de crecimiento: extracciones con agua, alcalinas, ácidas u orgánicas [5]. Todos estos métodos tienen limitaciones porque el proceso de secado transforma los ácidos polisilícicos y monosilícicos en dióxido de silicio, lo cual provoca problemas en la interpretación de datos. Ofrecemos como determinar el contenido de ácidos monosilícicos (Si disponible para la planta) en extracto acuoso de una muestra fresca de suelo. Un análisis de ácido monosilícico en suelo no parece ser suficiente para una caracterización completa de la deficiencia de Si en el suelo. El ácido monosilícico es una forma activa de Si que controla la nutrición en Si de las plantas y procesos biogeoquímicos primarios del suelo. Este es el **Si**

real, el que existe actualmente en la solución del suelo. Además del Si real, es necesario disponer de información sobre los compuestos de Si en el suelo que se pueden transformar (disolver) a la forma real en el futuro. Este es el **Si potencial**. El Si potencial puede ser determinado por el método de extracción por ácido hidroclicórico (0.1 N) del suelo seco. El método proporciona igualmente una correlación cercana con el Si en el tejido de la planta ($r^2=0.98$)[5].

La disolución de los compuestos ricos en Si sucede rápidamente. Durante una estación de crecimiento, así como las plantas tomen el Si, la concentración de ácido monosilícico en el suelo se recupera. Los valores de absorción de Si de las plantas lo demuestran definitivamente. Por ejemplo, durante una estación el arroz absorbe de 150 a 250 kg de Si-ha⁻¹, considerando que el suelo contiene sólo de 5 a 30 kg de Si real o Si disponible para la planta por hectárea en una capa de 10 cm de suelo. Por lo tanto, la concentración de ácido monosilícico debería ser restaurada unas 10 veces. Nuestros datos en el examen de suelos en Rusia, Ucrania, Gran Bretaña, EE.UU. y otros países han demostrado que normalmente el Si real está en una relación con el Si potencial de 1:10. Esto nos lleva a sugerir la siguiente fórmula para el Si activo: **Si Activo = 10 * Si Real + Si Potencial**

Los resultados del experimento en invernadero mostraron que el coeficiente de correlación entre el Si activo (parámetro calculado) y la concentración de Si en las raíces del arroz tenían valores altos para una función lineal ($R^2=0.95$) y una función polinomial ($R^2=0.95$). Tanto los compuestos de Si real y potencial son importantes para una nutrición con éxito de la planta en Si, y deberían ser examinados para determinar la deficiencia de Si en el suelo. Para evaluar la necesidad en fertilización con Si debería ser (1) desarrollada la clasificación de las deficiencias del suelo en Si real, potencial y activo; (2) mapeo de varias regiones. Sugerimos que las siguientes graduaciones de deficiencias en Si del suelo (tabla 2).

- **Suelo no deficiente** – No se requiere la fertilización con Si o la adición de enmiendas ricas en Si al suelo. A veces la aplicación de enmiendas de suelo ricas en Si tendría efectos beneficiosos mediante los compuestos de Si activo en las propiedades del suelo y el comportamiento NPK en el sistema planta-suelo.
- **Suelo con deficiencia baja** – La fertilización con Si es necesaria para las plantas acumuladoras de Si (cereales, hierbas). Las enmiendas de suelo ricas en Si son necesarias para optimizar la nutrición de la planta con P.
- **Suelo deficiente** – Los fertilizantes con Si y las enmiendas de suelo ricas en Si tienen un efecto estable y significativo en todas las cosechas e incrementan la fertilidad del suelo. Es necesaria una tasa estándar de aplicación de Si.
- **Suelo con deficiencia crítica** – La falta de Si activo tiene un efecto negativo en la productividad de las cosechas y ambientalmente. Son necesarias altas tasas de fertilizantes de Si o enmiendas de suelo ricas en Si.

Tabla 2.- Clasificación de suelos según la deficiencia en Si real y potencial

Nivel de deficiencia	Si Real	Si Potencial	Si Activo	Suelo
	-----mg kg ⁻¹ de Si en suelo-----			
Suelo no deficiente (W)	>40	>600	>1000	Mollisols vírgenes (Chernozems), suelos de cenizas volcánicas
Suelo con deficiencia baja (L)	20-40	300-600	500-1000	Mollisols cultivados, Mezclas de siembra en invernadero
Suelo deficiente (D)	10-20	100-300	200-500	Mayoría de los suelos cultivables
Suelo con deficiencia crítica (C)	0-10	0-100	0-200	Suelos tropicales, suelos arenosos, suelos cultivados degradados

Silicio en la planta

El silicio es una parte integral de las plantas. La distribución del silicio entre los órganos de la planta no es igual y puede variar desde el 0,001% en la pulpa del fruto hasta el 100-15% en el tejido epidérmico [3]. Las plantas tienen un mecanismo especial para la captación selectiva de ácido monosilícico de la solución del suelo [4]. Los tejidos vegetales están caracterizados por una concentración extremadamente alta de ácido mono y polisilícico en la savia y tiene la posibilidad de una rápida redistribución de este elemento [2]. El silicio proporciona funciones de protección en las plantas a niveles mecánicos, fisiológicos, químicos y bioquímicos.

Mecánicos

La acumulación de Si en el tejido epidérmico crea una protección mecánica del vegetal. Las moléculas absorbidas de ácido monosilícico son acumuladas en los tejidos epidérmicos [10] y forman la cubierta de sílice-celulosa donde el silicio está ligado con pectina y calcio [3]. Como resultado, se forma la doble capa cuticular que protege y refuerza mecánicamente los vegetales [3, 10]. La protección mecánica de las plantas contra tensiones bióticas (ataques de hongos e insectos) y abióticas (fijación de siembra), son probablemente los más investigados y populares para la explicación del efecto directo del fertilizante de Si en la resistencia del vegetal.

Fisiológicos

El efecto fisiológico del Si en los vegetales pasa por la formación de un sistema radicular más desarrollado (Figura 1). El ácido monosilícico ayuda a la estabilidad de las moléculas de clorofila y otros orgánulos, los que refuerzan la estabilidad fisiológica de la planta [2, 6, 9]. Nuestra hipótesis es que el incremento de la resistencia a la sequía por la aplicación de formas activas de Si también sucede por mecanismos fisiológicos. Las altas concentraciones de ácido polisilícico en el simplasto y el apoplasto de la planta pueden retener el agua y estas moléculas pueden ser usadas como un tanque de agua recargable [7]. Desafortunadamente la influencia del Si activo en este tipo de mecanismo ha sido muy poco investigada.



Figura 1.- Efecto de la fertilización con Si en el crecimiento de una planta de cítrico

Químico

La toxicidad salina es un problema agrícola mundial. Aproximadamente un tercio de la tierra cultivable mundial es árida y semi-árida, de las cuales la mitad está afectada por salinidad. En un futuro próximo, bajo el calentamiento global, el problema se incrementará. Hay bastantes hipótesis que pueden explicar el efecto del Si activo en la resistencia de la planta a la salinidad. (i) Mejoran la actividad fotosintética, (ii) aumentan el rango de selección K:Na, (iii) incrementan la actividad enzimática, y (iv) incrementan la concentración de sustancias solubles en el xilema, lo que provoca una reducción en la adsorción de sodio por los vegetales [2, 6, 9]. La aplicación de fertilizante de Si también protege químicamente las plantas contra la toxicidad de metales pesados [2].

Bioquímico

El Si puede jugar un papel importante en todos los mecanismos descritos anteriormente. Pero algunos efectos del Si activo en la protección de plantas (por ejemplo el incremento a la resistencia a las heladas), no puede ser explicado por procesos mecánicos, fisiológicos o químicos. Nuestra hipótesis es que hay mecanismos adicionales disponibles para la síntesis de protecciones específicas y no-específicas de tensiones en las células vegetales, los cuales son proporcionados por propiedades catalíticas de la matriz de ácido polisilícico [2]. Las presuposiciones adicionales para la síntesis de compuestos orgánicos en geles de ácidos polisilícicos en células vivas son las siguientes:

- El Si activo incrementa la resistencia del vegetal frente a CUALQUIER tipo de estrés [3, 6, 8, 9, 10];
- Cualquier estrés inicia un incremento de Si en los tejidos vegetales [2, 6, 9];
- Los tejidos vegetales contienen muy altas concentraciones de ácidos mono y polisilícicos [7];
- La optimización del Si en la nutrición del vegetal incrementa las cantidades de antioxidantes y fermentos en los tejidos vegetales [2, 6];
- Los ácidos polisilícicos son usados para la síntesis de moléculas orgánicas [1].

La influencia de cualquier tensión o estrés estimula en control del núcleo celular para la identificación del tipo de tensión (Figura 3). Tras la identificación el sistema de señales de la célula vegetal inicia el metabolismo y la síntesis proteica para la formación de protectores del estrés específicos y no específicos. Varios puntos en este proceso son críticos para la realización de la defensa del vegetal. En primer lugar, está el período de tiempo que se requiere para la identificación de la tensión. En segundo lugar, está el tiempo y energía para la síntesis de proteínas y metabolitos contra la tensión o estrés. El tiempo y la deficiencia energética son factores clave de la influencia negativa de las tensiones en la producción vegetal y en las posibilidades de supervivencia de la planta atacada por el agente estresante.

La alta concentración de ácido polisilícico en la célula vegetal y la posibilidad de usarlo para la síntesis catalítica directa de moléculas orgánicas puede consolidar este proceso. La tensión inicia el control nuclear por la identificación de este y pidiendo un transporte adicional de Si a la célula con problemas. Tras la identificación la síntesis de protectores específicos y no específicos es realizada por mecanismos bien conocidos y por la síntesis con bajos requerimientos energéticos (catalítica) de estas sustancias en una matriz de ácido polisilícico (Figura 3). Esta hipótesis da la posibilidad de usar Si activo para reforzar el sistema de protección del vegetal y dar una alternativa ecológicamente segura a los pesticidas.

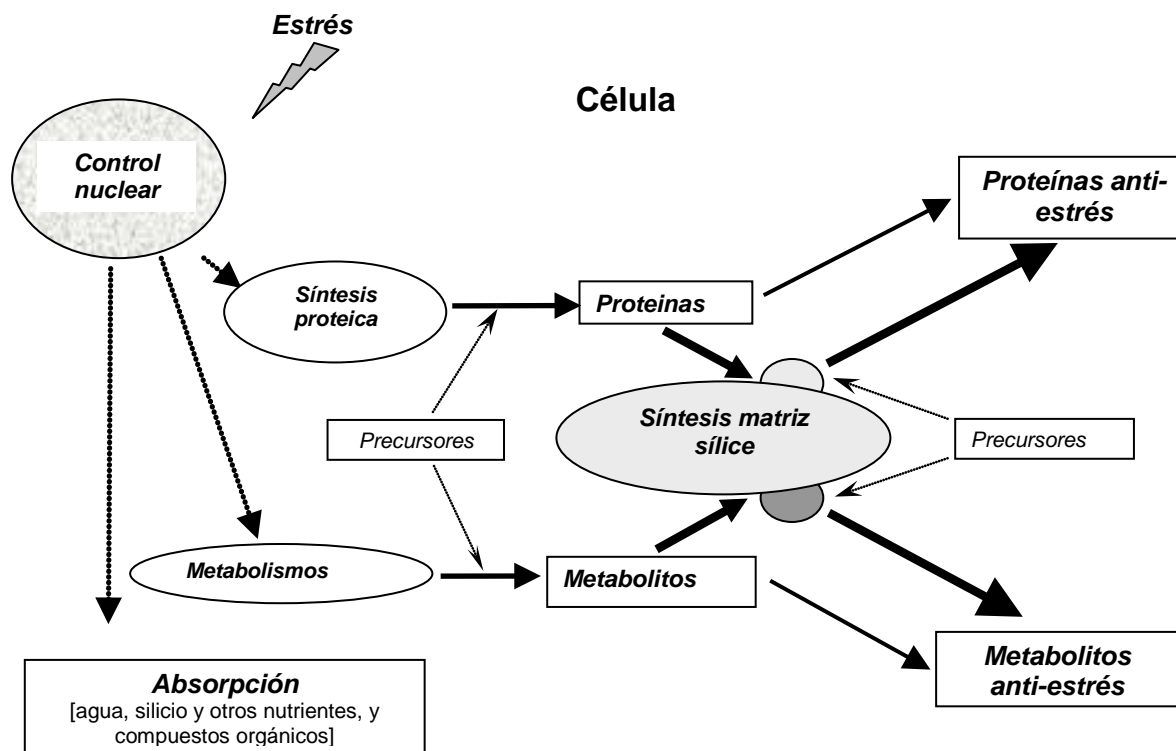


Figura 3. Esquema del sistema de protección frente a estrés de los vegetales

El descubrimiento de este mecanismo otorga nuevas oportunidades para la elaboración de nuevos y muy poderosos materiales amigables para la protección de vegetales cultivables. La coliflor (*Brassica oleracea* L.) fue usada como vegetal de estudio en invernadero. El pulgón (*Aphidae*, *Myzodes persicae*) fue empleado como factor de tensión para la infección del vegetal cultivado. Fueron probados fertilizantes de Si activado y no activado y comparados con un insecticida como Actara Sergenta. Los resultados obtenidos con coliflor se muestran en las Tablas 3 y 4. La aplicación de fertilizantes de Si no activados, activados y Actara Sergenta tuvo efectos positivos en la biomasa de brotes y raíces de la coliflor y redujeron la infección del vegetal por el pulgón. El máximo efecto se observó para el fertilizante de Si activo (tabla 3). La aplicación de Si no activo tuvo los efectos más bajos en comparación con el Si activo. Se consideró que Actara Sergenta también tuvo efecto positivo en la coliflor.

Tabla 3.- Efecto de los fertilizantes de Si y el insecticida de Syngenta en la biomasa de plantas de 1 mes de edad (raíces y brotes) y el % de hojas de coliflor infectadas por el pulgón

Tratamiento	Peso de una planta, g		% de hojas infectadas
	Brotes	Raíces	
Control	6.79	0.10	75
Fertilizante de Si no activado	7.27	0.11	58
Fertilizante de Si activado	8.82	0.13	7
Actara Sergenta	7.54	0.13	24
LSD ₀₅	0.25	0.01	3

En la Tabla 4 se muestra la cosecha de coliflor que se obtuvo en el invernadero. La máxima cosecha se obtuvo en el cultivo con fertilizante de Si activo (incrementando un 173% en comparación con el control). La aplicación de Actara Sergenta también tuvo un efecto elevado (incrementando un 142% en comparación con el control). Pero este pesticida no

puede ser permitido para la agricultura orgánica, mientras que el fertilizante de Si activado está aprobado por el CERES (Certificación de Estándares Medioambientales GMBH) para agricultura orgánica.

Tabla 4.- Efecto de fertilizantes de Si en el cultivo de coliflor

Tratamiento	t/ha	
	Media	Incremento, %
Control	5.30	-
Fertilizante de Si no activado	8.56	61
Fertilizante de Si activado	14.49	173
Actara Sergenta	12.82	142
LSD ₀₅	0.2	

El uso del suelo bajo plantaciones agrícolas destruye el balance de nutrientes por su cultivo y cosecha anuales. La extracción de Si activo de la tierra de cultivo oscila entre 40 a 300 hg de Si por ha [6]. El incremento en la falta de Si causa un número de consecuencias negativas para el suelo y el vegetal. La deficiencia en Si acelera los procesos de degradación del suelo manifestados como la reducción de la materia orgánica del suelo, la disminución de las capacidades de adsorción y retención de agua, incrementándose la actividad del Al. La reducción del Si disponible por el vegetal reduce dramáticamente en el suelo el sistema de defensa natural del vegetal frente a tensiones bióticas y abióticas [2, 6].

Las tecnologías modernas del uso de sustancias ricas en Si permite reducir la aplicación de pesticidas entre el 50 y el 70%, o retirando este tipo de agroquímicos de los cultivos de vegetales [2]. Los fertilizantes de Si promocionan la transformación de fosfatos no utilizables por los vegetales en formas disponibles y previenen la transformación de fertilizantes fosfatados en compuestos inmóviles. La enmienda de Si al suelo puede reducir bruscamente la lixiviación de nutrientes de suelos arenosos y retener los nutrientes en formas disponibles para las plantas [6, 9]. La aplicación de fertilizantes minerales tradicionales (N, P, K) también se puede reducir como resultado de la fertilización con un 30-50% de Si. Este efecto del Si activo reduce dramáticamente los costes de mantenimiento para la actividad agrícola y da una oportunidad a la agricultura orgánica.

Referencias

- [1] Banerjee A.K., Laya Mimo M.S., Vera Vegas W.J. (2001). Silica gel in organic synthesis // *Russian Chemical Reviews*, 70(11): 971–990.
- [2] Biel K.; Matichenkov V.; Fomina I. (2008). Protective role of silicon in living system // *Functional foods for chronic diseases*, Ed. D. Martirosian, D&A Inc., Richardson, TX, pp. 208-231
- [3] Ma J.; Takahashi E. (2002). Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier, The Netherlands, 281 p.
- [4] Ma J.; Tamai K.; Yamaji N.; Mitani M.; Konishi S.; Katsuhara M.; Ishiguro M.; Murata Y.; Yano M. (2006). Silicon transporter in rice // *Nature* 440, pp. 688–691.
- [5] Matichenkov V.V. (2007). Soil gradation on the plant-available Si // *Agrokhimiya (Agrochemistry) [in Russian]*, 7: 47-58.
- [6] Matichenkov V.V., Ammosova Y.M., Bocharnikova E.A. (2001). Influence of silicon fertilizers on plants and soil // *Agrokhimiya (Agrochemistry) [in Russian]* 12: 30–38.

- [7] Matichenkov V.V., Bocharnikova E.A., Kosobrukhov A.A., Biel K.Y. (2008). About mobile forms of silicon in plants // *Russian Academy of Science Reports*. 418(32): 279-281.
- [8] Savant, N.K., Snyder, G.H., Korndorfer G.H. 1997. Silicon management and sustainable rice production // *Advance Agronomy* 58: 151–199.
- [9] Snyder G.; Matichenkov V.; Datnoff L. (2006). Silicon // *Handbook of Plant Nutrition*. Massachusetts University, pp. 551–568.
- [10] Yoshida S. 1975. The physiology of silicon in rice // *Tech. Bull. n. 25, Food Fert. Tech. Centr., Taipei, Taiwan*.