

# ROL DEL SILICIO EN LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS Y LA NUTRICIÓN VEGETAL<sup>1</sup>

## ROLE OF SILICON IN SOIL FERTILITY AND PLANT NUTRITION

Luis Vallejo B.<sup>2</sup>  
Soraya Alvarado<sup>3</sup>

### RESUMEN

El silicio (Si) es el segundo mineral más abundante en la corteza terrestre y cumple importantes funciones para mejorar la fertilidad del suelo y coadyuvar a la resistencia de los cultivos a plagas y enfermedades y al estrés biótico y abiótico, anualmente los cultivos extraen de 40 a 300 kg/ha de Si. La destrucción de los complejos órgano – minerales aceleran la degradación de la materia orgánica en los suelos, la aplicación de Si favorece la restauración de suelos degradados al incrementar la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). La aplicación al suelo de minerales ricos en Si favorece la asimilación del P por parte de las plantas, permitiendo la liberación del P fijado en el suelo a formas biodisponibles. Se conoce que el Si contrarresta el antagonismo generado en los suelos por la alta saturación de aluminio (Al) y hierro (Fe) como los Andisoles, pues se bloquea la absorción del Al, favoreciendo el crecimiento radicular (Corrales *et al.*, 1997). En Oxisoles se recomienda la aplicación de silicatos de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) o magnesio ( $\text{MgSiO}_3$ ) para aumentar la biodisponibilidad de P y disminuir la fijación del ión ortofosfato (Carvalho, 1999).

Descriptores: Resistencia, plagas, aplicación, asimilación

### SUMMARY

Silicon (Si) is the second most abundant element in the earth; it plays important functions to improve soil fertility and to contribute to the resistance of crop pests and diseases increasing plant resistance to biotic and abiotic stresses, annually crops extract from 40 to 300 kg/ha of Si. Si lead to the destruction of the organic-mineral complexes accelerating the degradation of soil organic matter. Soil fertility with Si increase water holding capacity and cation exchange capacity. Application of minerals rich in Si to the soil increases P uptake by the plants, promotes the transformation of P unavailable forms to available ones. It is known that Si can counteract the antagonism generated in soils by high Al and Fe saturation in soils like Andosols. Si will stop the Al absorption and the root grow will increase (Corrales *et al.*, 1997). In Oxisols is recommended the application of calcium silicates ( $\text{CaSiO}_3$ ) or magnesium ( $\text{MgSiO}_3$ ) to increase the bioavailability of soil P and to lower P fixation (Carvalho, 1999).

Descriptors: Resistance, pest, application, assimilation.

---

<sup>1</sup> Resumen Tesina de grado previa la obtención del título de Especialista en Manejo de Suelos y Nutrición Vegetal.

<sup>2</sup> Estudiante posgrado. Gerente Técnico Agroenlaces del Ecuador. [lvallejo@agroenlacesdeecuador.com](mailto:lvallejo@agroenlacesdeecuador.com).

<sup>3</sup> Tutora. Directora Departamento Suelos INIAP. Profesora Posgrado Química de Suelos.

## **INTRODUCCIÓN**

El Si es un elemento abundante en la naturaleza; sin embargo, en casi todos los estudios nutricionales con plantas no se lo ha considerado con la importancia de los macro y micronutrientes. Así mismo, al Si se lo ha calificado como un nutriente “anormal” pues no es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, está documentado que la presencia de éste elemento favorece el desarrollo de los cultivos a través de la inducción de resistencia y protección a diversos factores ambientales (Danoff y Rodrigues, 2005).

En la actualidad países como México, Brasil, Japón entre otros están realizando estudios sobre las ventajas que el Si brinda a los cultivos para su desarrollo. Según Quero mencionado por Orejuela (2010), el Si como mejorador del suelo puede reducir la lixiviación de los nutrientes en los suelos arenosos, especialmente la de nitrógeno (N) y K, almacenándolos en una forma disponible para las plantas. La presencia de una mayor concentración de Si en el suelo a través de la aplicación de minerales ricos en este elemento tendría un doble efecto beneficioso en el sistema suelo-planta. En primer lugar, el Si reforzaría las propiedades de la planta para protegerse contra las enfermedades, ataques de insectos y condiciones climáticas desfavorables. En segundo lugar, el Si activo en el suelo optimizaría la calidad del mismo a través del mejoramiento del uso del agua y de las propiedades físicas y químicas; manteniendo a los nutrientes en forma biodisponible (Flórez, 2009), lo que llevaría al incremento de la productividad y calidad de las cosechas (Quero y Cárdenas, 2007).

Esta revisión bibliográfica permitirá presentar el conocimiento generado hasta la fecha sobre el Si en el sistema suelo-planta; esperando constituirse en una fuente de consulta y en la evidencia del requerimiento de desarrollo de estudios a nivel de laboratorio, invernadero y campo para evaluar el uso de Si como enmienda en suelos agrícolas del Ecuador.

## **OBJETIVOS**

### **2.1. GENERAL**

Realizar una revisión bibliográfica sobre la importancia del Si en la fertilidad de los suelos y en la nutrición vegetal.

### **2.2. ESPECÍFICOS**

- Documentar la importancia del Si en la física y química de los suelos.
- Revisar el rol del Si en la nutrición de plantas.
- Sustentar desde el punto de vista teórico el efecto de la aplicación de Si en la química del P en Andisoles y Oxisoles.
- Recopilar información sobre experimentos de campo que hayan evaluado el efecto de la aplicación de Si como enmienda en suelos agrícolas.
- Recopilar información sobre el efecto del Si en la protección de plagas, enfermedades y condiciones ambientales adversas.

## **METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo éste trabajo se revisaron libros, artículos publicados, documentos que se encontraron en institutos relacionados con la ciencia del suelo, investigaciones realizadas publicadas en la web y experiencias de profesionales involucrados con el tema.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1. ROL DEL SILICIO EN EL SUELO**

#### **1.1. Importancia del silicio en el suelo**

El Si es uno de los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. No obstante, la acción de meteorización hace que el Si natural sea insuficiente para desempeñar su papel como nutriente de los cultivos, siendo necesaria una fertilización complementaria. Suelos muy meteorizados, altamente lixiviados y ácidos, con bajos niveles de Si intercambiable son considerados pobres en Si disponible para las plantas (Brady, 1992). La acción de agentes abióticos como temperatura, lluvia y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) disuelto en el agua sobre los minerales arcillosos provoca la liberación del ácido silícico a una concentración de 1 a 50 mg/kg, acompañada de elementos minerales que permiten la formación de silicatos de Ca, Mg, K, Zn, Fe; incrementando la CIC y pH de los suelos, condiciones que favorecen el nivel de fertilidad de los mismos (Hasing, 2007).

La importancia de la aplicación de Si al suelo se debe a que existe evidencia de restauración en suelos degradados. De 40 a 300 kg de Si/ha de suelo cultivado son extraídos anualmente en las cosechas. La falta de ácidos monosilícicos y la disminución de Si amorfo conducen en parte a la destrucción de los complejos órgano-minerales, esto acelera la degradación de la materia orgánica del suelo disminuyendo la calidad del mismo. La fertilización con minerales que contienen Si es importante para una agricultura sustentable y altamente efectiva en cualquier tipo de suelo según Quero (2008). Este autor sostiene que el Si incrementa la resistencia del suelo contra la erosión, puesto que remedia y restaura su estructura al promover la formación de agregados coloidales con lo que incrementa la capacidad de retención de agua (de 30 a 100%) y la CIC, especialmente en suelos con pH mayor a 7.0. Además, el Si reduciría la lixiviación de P, N y K; por lo que el uso de este elemento como mejorador es recomendado principalmente en suelos arenosos. La fertilización con minerales ricos en Si promueve la transformación del P no disponible para la planta en formas asimilables, permitiendo que la asimilación del P por las plantas aumente de un 40 a 60%; y previene la inmovilización de las fuentes fosfatadas incrementando la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200% (Quero, 2008).

#### **1.2. Forma del silicio en los suelos**

El Si en el suelo se combina con el oxígeno para formar la lámina de sílice. La unidad básica de la lámina de sílice es el tetraedro de sílice (un átomo de Si rodeado por cuatro átomos de oxígeno) (Plaster, 2000). El grupo de los silicatos, como su nombre lo indica, son derivados del ácido silícico ( $\text{SiO}_4$ )<sup>-4</sup> o de sus polímeros y constituyen los minerales más importantes de casi todas las rocas. Según Jackson mencionado por Fassbender y Bornemisza (1994), casi el 80% de los minerales de las rocas ígneas y metamórficas son silicatos. En rocas sedimentarias su contenido es menor (Fassbender y Bornemisza, 1994). Los silicatos de Al, Ca y Mg son los principales constituyentes de arenas, rocas y suelos en forma de feldespatos, anfíboles, piroxenos, micas y zeolitas, así como de piedras semipreciosas entre las que figuran la olivina ((Mg,

$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), granate ( $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ), circón ( $\text{ZrSiO}_4$ ), topacio ( $\text{Al}_2(\text{OH},\text{F})_2\text{SiO}_4$ ) y trumalina ( $\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ ) (MSN Encarta, 2010).

### 1.3. Química del silicio en el suelo

El ácido monosilícico siendo producto de la disolución de minerales ricos en Si puede ser adsorbido por sesquióxidos y disociado bajo condiciones de pH mayores a 9.4. Sin embargo, esta es una de las formas disponibles del Si para ser absorbido por las plantas y microorganismos (Mengel, 1991; Matichenkov y Calvert, 2002). Se encuentra en la solución del suelo a una concentración de 0.1 a 0.6 mol/m<sup>3</sup>, lo que representa el doble de la concentración en que el P es encontrado como  $\text{H}_2\text{PO}_4/(\text{HPO}_4)^{2-}$  (Raven, 2001). Según Quero (2008), la riqueza mineral de suelos de diferentes regiones agrícolas de México se indica que el contenido de Si y Al se relacionan con el pH de la solución del suelo. A medida que el pH pasa de suelo ácido a alcalino, el contenido de Si se incrementa a una relación de 79.05 ton/ha por unidad de pH. Esto implica que cuando un suelo con un pH de 8.0 pasa a 4.0 se remueven del suelo aproximadamente 300 ton/ha de Si elemental.

Las variaciones en la concentración del Si tendrían efectos sobre diferentes procesos del suelo y el crecimiento de microorganismos y plantas. En los ecosistemas terrestres, el ciclo biogeoquímico del Si es más intenso que el ciclo del P y del K. Las raíces aparentemente liberan enzimas (Silicazas y Silicateinas), compuestos orgánicos (ácido cítrico) y protones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) que solubilizan el Si presente en las arcillas, que provienen de las rocas y minerales cuando son meteorizados por las condiciones del medio ambiente como lluvia, temperatura, viento, y las acciones mecánicas del manejo de suelos (Quero, 2008).

En cuanto al pH del suelo, la aplicación de Si provoca un aumento significativo (Cabral *et al.*, 2008). Según Alcarde (1992), este aumento en el pH del suelo debe ser efecto de neutralización de la alcalinidad ejercida por la fuente de Si, que promueve la reacción de aniones  $(\text{SiO}_3)^{-2}$  con protones hidrógeno. Carvalho - Pupatto *et al.* (2004) mencionado por Cabral *et al.* (2008), afirman que la aplicación de Si al suelo, además de aumentar el pH, reduce la acidez potencial del suelo.

## 2. EL SILICIO EN LA NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS

### 2.1. Forma de absorción y acumulación del silicio

El Si es absorbido por las plantas en forma energéticamente pasiva (Epstein, 1994), siendo tomado por las raíces de la solución del suelo como ácido monosilícico para ser acumulado en las células epidermales que las impregna en una fina capa (2,5  $\mu\text{m}$ ) (Yoshida, 1975; Loué, 1988). Al asociarse el Si con pectinas y polifenoles en la pared celular puede convertirse en barreras efectivas a la pérdida de agua, transpiración cuticular e infecciones fungosas (Epstein, 1994). Esto último se explica con un efecto casi netamente físico; pues la pared celular es menos susceptible a la degradación enzimática que acompaña la penetración de la pared celular por las hifas de los hongos (Salvant *et al.*, 1997). La forma de Si que permanece dentro de las plantas es el de gel sílica (sílica amorfa e hidratado o ácido silícico polimerizado). Otras formas de Si incluyen al ácido silícico y el ácido silícico coloidal (Datnoff y Rodrigues, 2005; Liang, *et al.*, 2005). La distribución del Si dentro de las plantas depende de las especies. En plantas de bajo contenido de Si como tomate, rábano y col china no se distingue una tendencia en la cantidad de

Si en la parte aérea ó en la parte subterránea de la planta; en otros casos como el trébol de carmesí, la raíz acumula niveles más altos de Si con respecto a la parte aérea. Sin embargo, en plantas de alto contenido de Si como el arroz y la avena, el 90% de este elemento se encuentra en la parte aérea (Liang *et al.*, 2005).

En las gramíneas, una porción considerable de Si está en la epidermis de la hoja y se localiza intercelularmente. La deposición de Si se ubica en los tricomas de las hojas, primordios, brácteas de las inflorescencias y en la hoja bandera de los cereales como el trigo (Hodson, 1989).

Se ha demostrado que la absorción de Si se satura a una concentración externa de 1.28 mM, indicando que la absorción de este elemento es medida por un tipo de transportadores proteínicos. Recientemente se ha descubierto que al menos dos transportadores se encuentran involucrados en la absorción de Si en las raíces de arroz. Uno de ellos se encuentra localizado en la membrana plasmática de las células corticales de la raíz (SIT1: Transportador de Si 1), el cual transporta este elemento desde la solución externa hasta las células corticales de la raíz. El otro transportador se encuentra localizado en la membrana plasmática de las células parenquimatosas del xilema (SIT2: Transportador de Si 2), el cual es responsable de liberar el Si dentro del xilema. Estos transportadores pueden tener diferentes afinidades para el ácido silícico (Ma *et al.*, 2004).

## **2.2. Funciones del Si en la planta**

El Si juega un papel importante en la planta. Este elemento controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, incrementa la resistencia de la planta al estrés abiótico (alta y baja temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, Al, etc.) y al estrés biótico (insectos, hongos, enfermedades) (Quero, 2008). El Si se acumula en la epidermis y se asocia con la pectina e iones de Ca, endureciendo el tejido y protegiendo así el ingreso de patógenos a la planta. También en la epidermis se forman los tricomas tanto en las hojas, tallos, flores, frutos y raíces, estos últimos son los encargados de absorber agua y nutrientes del suelo. El grupo de células de la epidermis que participa activamente en la protección de los tejidos de la planta contra agentes abióticos y bióticos son los tricomas, sus características morfológicas y mecánicas (densidad, tamaño, textura superficial, forma, orientación) pueden influir en la respuesta fisiológica y ecológica de las plantas. Los tricomas glandulares a través de la liberación de compuestos fitoquímicos permiten la resistencia y tolerancia de las plantas al ataque de agentes bióticos, permitiendo el control biológico de plagas y enfermedades (Matichenkov, 2006).

Ha sido también demostrado que la adición de cantidades mínimas de Si soluble incrementa la tolerancia a sales en trigo (Ahmad *et al.*, 1992), mezquite (Bradbury y Ahmad, 1990), arroz (Danoff y Rodrigues, 2005; Epstein, 1994) y cebada (Liang *et al.*, 1996). Algunas hipótesis sobre como el Si incrementa la tolerancia a sales son: 1) mediante el aumento de la actividad fotosintética, 2) incrementando la relación de selectividad  $K^+ : Na^+$  a través de la activación de la H-ATPasa en las membranas, 3) incrementando la concentración de solutos en el xilema, lo que resulta en una reducida absorción de sodio (Na) por las plantas, y 4) aumentando la actividad de enzimas antioxidantes como superoxidodismutasa, peroxidasa, catalasa y gluatión reductasa, reduciéndose de esta manera la peroxidación de lípidos en las raíces (Liang *et al.*, 2003).

Una teoría, aún poco discutida, sostiene que el desarrollo mostrado por los pastos de *Brachiaria* en suelos de la sabana (Typic Haplustox) de Brasil, se debe a su mayor capacidad de absorción y acumulación de Si. El papel desempeñado por el Si en estos pastos pueden ser vinculados a una reducción de los efectos tóxicos de Al, manganeso (Mn) y Fe, como ya se ha observado para otros pastos, y también porque muy probablemente el Si es responsable de regular la transpiración (Cocker *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 1997; Datnoff *et al.*, 2001).

### **2.3. Síntomas de deficiencia de Si en las plantas**

En algunas especies como el sauce llorón la deficiencia de Si tiene efectos sobre su crecimiento, marchita sus hojas y provoca otros síntomas de marchites. También se ha comprobado su esencialidad en la caña de azúcar, el tomate y el pepino. Las plantas deficientes en Si son quebradizas y susceptibles a infecciones fúngicas (Heine, 2005; Liang *et al.*, 2005).

### **2.4. Interacción del Si con otros nutrientes**

El Si puede estimular el crecimiento, este efecto es posible debido a que es capaz de aligerar el desequilibrio entre otros elementos. En pepino, se demostró que su adición de Si en la solución rectificó el desbalance entre Zn y P (Epstein, 1994).

Por otra parte, se ha observado que las deficiencias de P en cereales, principalmente en arroz, disminuyen con las aplicaciones de silicatos (Yoshida, 1969); ya que el Si en su forma de ión silicato aumenta la disponibilidad de P al liberarlo a partir de los coloides del suelo y de los fosfatos de Fe, Mn y Al, en suelos ácidos. Una sustitución de los fosfatos por los silicatos, permite a su vez contrarrestar el efecto tóxico de los microelementos metálicos (Epstein y Bloom, 2005; Oduka y Takahashi, 1961; Fassbender y Muller, 1967).

El Si tiene acción sinérgica con el Ca, Mg y K, mejorando la vida media de productos perecederos, como hortalizas, incrementando la productividad y la eficiencia de las prácticas de post-cosecha (Rogalla y Römheld, 2002).

### **2.5. Uso del Si para el manejo integrado de plagas y enfermedades**

El Si no es considerado como un elemento esencial pero los reportes dan muestras de que la presencia de éste beneficia a los cultivos, por inducción de resistencia y protección contra diversos factores ambientales bióticos y abióticos (Matichenkov, 2006).

Algunos experimentos han mostrado que, cuando el insecto devora las hojas de maíz en un suelo remineralizado, es decir, donde se aplicaron minerales primarios amorfos ricos en Si, sus mandíbulas se deterioran, dificultando su alimentación (Quero, 2007; Matichenkov, 2006).

Nuevos datos obtenidos en los laboratorios, invernaderos y experimentos a nivel de campo, sustentan una nueva hipótesis en la que se considera la actividad del Si en el refuerzo del sistema defensivo de las plantas. De acuerdo con dicha hipótesis, las plantas tienen un mecanismo de protección que envuelve los componentes móviles del Si (principalmente ácido monosilícico y ácido polisilícico). Se especula que la función del Si puede proveer una síntesis adicional de moléculas de protección por stress y ésta síntesis está genéticamente presente, pero no tiene participación física de los aparatos genéticos (Biel *et al.*, 2008). Esta hipótesis se fundamenta en

experimentos indirectos, y en una básica subordinación de dos constituciones: (a) respuesta del aparato genético al stress, la síntesis de compuestos de protección como enzimas antioxidantes, proteínas de stress, glutamato, fenoles y otros antioxidantes, y (b) formación enzimática de los mismos componentes de protección en las matrices de ácidos polisilícicos. En varios estudios realizados en cítricos específicamente limón en post cosecha se utilizó el silicato de potasio con el fin de reducir la incidencia de *Penicillium digitatum*. Como resultado se determinó la existencia de una correlación entre el retraso de la pudrición de la fruta y la concentración del silicato de potasio. El mejor control se obtuvo con el silicato de potasio a una concentración de 100,000 mg L<sup>-1</sup> presentando el menor diámetro de lesiones al aplicarlo como tratamiento preventivo (3 h antes de la inoculación con *Penicillium digitatum*) o como tratamiento curativo (3 h después de la inoculación con *Penicillium digitatum*). Las aplicaciones continuas de silicato de potasio en limón Valencia y naranja Californiana durante toda la temporada, dio como resultado una significativa reducción en la incidencia de *Penicillium digitatum* en ambas frutas (Abraham *et al.*, 2008).

### 3. EL SILICIO COMO ENMIENDA EN SUELOS AGRÍCOLAS

#### 3.1. Fuentes de Si en el mercado

En el mercado nacional existen pocas fuentes de Si, las cuales son detalladas a continuación.

#### **MAGNESIL®**

Fertilizante edáfico fuente de Mg y Si para cultivos en general. Su composición química responde a 35% de MgO y 3% de SiO<sub>2</sub> (Fertiandino, 2010).

#### **SULFAMENORES®**

Contiene elementos secundarios y micronutrientes. Las fuentes utilizadas en los sulfamenores son de rápida, media y lenta asimilación. Entre los sulfamenores figuran tres tipos:

**SULFAMENORES I:** Fertilizante edáfico granulado de color amarillo que contiene 20% de Ca, 12% de MgO, 5% de S, 1% de B, 2% de Zn, 13% de Si, 0.25% de Fe, 0.2% de Mn, 0.03% de Mo, 0.001% de Co, y 0.005% de Ni.

**SULFAMENORES II:** Fertilizante edáfico granulado de color azul que contiene 24% de Mg, 16% de S, 1.4% de B, 4% de Zn y 15% de Si.

**SULFAMENORES III:** Fertilizante edáfico granulado de color rojo que contine 16% de Mg, 8% de S, 1% de B, 4% de Zn, 17% de Si y 20% de Ca. Esta fuente es considerada ideal para cultivos forrajeros.

#### **FOSSIL SHELL AGRO**

Fertilizante mineral micropulverizado para toda clase de cultivos conteniendo microalgas de agua dulces así como 3.65% de Al; 0.16% de B; 1.10% de Ca; 0.50% de Mg; 0.20% de Mn; 0.30% de K; 86.40% de SiO<sub>2</sub>; 0.60% de Na entre otros. Las dosis recomendadas para su aplicación son via foliar 1 – 2 kg/ha/mes (avioneta 0.5 kg/ha); edáfica 10 – 12 kg/ha una vez por ciclo o dos veces por año (Mundo Verde, 2011). En cuanto a dosis, frecuencias y épocas de aplicación no han sido determinadas para la mayoría de los suelos y cultivos del Ecuador.

### 3.2. Efecto de la aplicación de Si sobre la química del P

El P es el nutriente que más limita la producción de biomasa en los suelos tropicales debido al alto potencial de estos suelos para fijar P (Novais y Smyth, 1999; Raij 1991). Frente a lo cual, la aplicación de silicatos en el suelo podría ser de gran ayuda para aumentar la eficacia de los fertilizantes fosfatados, debido a que el anión silicato ( $\text{H}_2\text{SiO}_4^-$ ) y el anión fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) compiten por el mismo sitio de adsorción; reduciendo el grado de fijación de P en el suelo (Leite, 1997). Según Quero (2007) el ácido monosilícico reacciona con los fosfatos insolubles de Al, Fe, Mn y Ca, formando silicatos y liberando el ión ortofosfato que puede ser absorbido por las plantas. De esta forma el Si favorece la absorción del P por las plantas de un 40 a 60% sin la aplicación de fuentes fosfatadas e incrementa la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200%, previniendo la transformación del P a compuestos inmóviles.

En un suelo de la India con capacidad de fijación de P del 85% a un pH de 4.5, se aplicó Si en forma de silicato de sodio y P como fosfato monocálcico en dosis de 0, 1000, 1500, 2000 mg ( $\text{SiO}_2$ )  $\text{kg}^{-1}$  y 0, 10, 20, 40 mg ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $\text{kg}^{-1}$ . Los resultados mostraron una respuesta positiva de la producción de materia seca frente a las aplicaciones de P en presencia de Si. Sin embargo, la liberación de P en la solución del suelo no se dio desde el inicio hasta el fin del experimento, ya que no se observó hidrólisis de los fosfatos de Fe y Al (Sawarkar y Pathak, 1985).

En un estudio realizado por Guerrero y Cabrera (1972) en suelos volcánicos de Colombia, se determinó que incrementos en el contenido de  $\text{SiO}_2$  (100%) tienen un efecto estadísticamente significativo en la disminución de la precipitación total de P (11,2%), en especial la generada con fosfatos de Fe, provocando un incremento significativo en la biodisponibilidad de P.

La eficiencia de utilización de N está también directamente relacionada con la del P y esta a su vez con la presencia de silicatos. Esto se explica ya que la mayor disponibilidad de P favorecida por el silicato aumenta el desarrollo del sistema radicular; y por lo tanto, incremento de los sitios de infección en la raíz a ser colonizada por bacterias fijadoras de N (Lopes *et al.*, 2010).

### 3.3. Efecto de la aplicación de Si en Andisoles

Los Andisoles son suelos que contienen materiales amorfos, como alófana e imogolita; y se caracterizan por presentar un pH en floururo de sodio (NaF) mayor a 9 y una gran capacidad de fijación de P (6.944 a 14.208  $\mu\text{g}$  de P  $\text{g}^{-1}$  de suelo); la cual está relacionada estrechamente con la presencia de Al extractable con oxalato (Poudel *et al.*, 1999). La capacidad de fijación de P de los Andisoles varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez provoca cambios en el efecto residual de las aplicaciones de fosfato (Espinosa, S.F.). Los mecanismos de fijación de P en la alofana e imogolita incluyen procesos como quemadsorción, desplazamiento de Si estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica. Por otro lado, los grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con  $\text{HPO}_4^-$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , fijando fuertemente el P aplicado.

La aplicación del Si en Andisoles permitiría la liberación del P fijado por reemplazo con los iones silicatos en los sitios de absorción en los complejos humus-Al; así como por reacción con el Al y

Fe de los óxidos respectivos. Corrales *et al.* (1997) mencionan que la aplicación de Si bloquearía la absorción de Al por parte de las plantas. Estos autores establecieron plantas de maíz sensibles a Al y observaron que las raíces de las plantas que crecían en soluciones con Si se desarrollaban mejor que las que crecían en las soluciones sin Si. En otro experimento realizado con adiciones de metasilicato de Na, en los cuales se cultivó chícharo, se observó también un efecto positivo de dicha aplicación con un incremento en la altura media de las plantas y en las biomásas medias, fresca y seca de la vaina (Miramontes *et al.*, 2004).

### **3.4. Efecto de la aplicación de Si en Oxisoles**

El término "oxisol" proviene de "*oxide*" en referencia a la dominancia de minerales oxidados. Los Oxisoles se definen como suelos que contienen a todas las profundidades no más del 10% de minerales meteorizables, y menos del 10% de saturación de bases. Los Oxisoles siempre tienen color rojo o amarillo, debido a la alta concentración de óxidos e hidróxidos de Fe y Al. Además contienen cuarzo y caolinita y en cantidades más pequeñas otros minerales arcillosos y materia orgánica. Los Oxisoles se hallan mayoritaria y exclusivamente en áreas tropicales de Sudamérica y de África, siempre en cratones continentales altamente estables. En Australia vastas áreas formalmente cubiertas de selvas, pasaron a ser tan secas, que los Oxisoles forman duras piedras férricas cubiertas solo por Orthents (suelos esqueléticos) (Wikipedia, 2011).

El uso de silicato de Ca o silicato de Mg en suelos ácidos aumenta la disponibilidad de P para las plantas, disminuyendo la fijación del ión ortofosfato (Carvalho, 1999). En un estudio relacionado con la interacción de Si-P en un suelo arenoso, en condiciones de laboratorio, Leite (1997) verificó el desplazamiento de P por el Si y vice-versa, recomendando la necesidad de la inclusión de las fuentes de Si en los programas de fertilización con P para Oxisoles, especialmente en los de baja disponibilidad de Si. Los efectos positivos de la aplicación de silicato al suelo son generalmente asociados con un aumento de la disponibilidad de Si y el aumento del pH (Smyth y Sánchez, 1980), con mayor disponibilidad de P (Roy *et al.*, 1971), y con la tolerancia de las plantas al exceso de Al y Fe (Mengel y Kirkby, 2001).

## **CONCLUSIONES**

- 1.** La importancia del Si en la química del suelo radica en su relación con el pH, la dinámica del P y la CIC; lo que consecuentemente tiene una influencia directa sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo.
- 2.** Existe algunas evidencias que la aplicación del Si al suelo en calidad de enmienda incrementa la calidad del suelo. Se destaca el aumento de la CIC y de la biodisponibilidad de P, N, K, Mg, Ca y Zn. En cuanto a las propiedades físicas favorecería a un menor escurrimiento por lo que reduciría la erosión del suelo, así como, incrementaría la capacidad de retención de agua.
- 3.** Si la aplicación de Si al suelo favorece la asimilación del P por parte de las plantas al liberar el P fijado en el suelo, ésta a su vez también prevendría la transformación de fertilizantes ricos en P en compuestos inmóviles una vez que son aplicados al suelo aumentando la eficiencia de uso de estas fuentes.

4. El mecanismo de liberación del P fijado en el suelo a través de la adición de fuentes silicatadas se explica porque los aniones silicato y fosfato compiten por el mismo sitio de adsorción en cuanto a complejos humus-Al. Adicionalmente, el ácido monosilícico reacciona con los fosfatos insolubles de Al, Fe, Mn y Ca para formar silicatos de cada uno de estos elementos liberando el ión ortofosfato para que pueda ser absorbido por las plantas.
5. El Si controla el desarrollo del sistema radicular, la asimilación y distribución de nutrientes minerales, incrementa la resistencia de la planta al estrés abiótico y biótico. En definitiva tiene acción dinámica en la relación suelo – agua – planta.
6. Aún no se conocen sobre dosis, frecuencias y épocas de aplicación de fuentes silicatadas para la mayoría de cultivos. En el caso particular de Ecuador, no existen suficientes estudios para la evaluación del efecto de la aplicación de Si en diferentes tipos de suelos y cultivos.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones en laboratorio, invernadero y campo de los efectos del Si en suelos y cultivos del Ecuador.
2. Realizar curvas de absorción de Si en diferentes cultivos de importancia económica que permitan elucidar sobre requerimientos de este elemento.
3. Realizar ensayos de aplicaciones de Si en andisoles y oxisoles para demostrar su efecto sobre las propiedades químicas de dichos suelos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abraham, AO, Laing, MD, Bower, JP and Clark, C. 2008. Silicon in Agriculture (2008, South Africa). Preharvest or Postharvest Silicon treatment for the control of Postharvest *Penicillium digitatum* of citrus fruit. 74pp
2. Ahmad, R., S. Zaheer, and S. Ismail. 1992. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Sci. 85: 43-50.
3. Biel, K., Matichenkov, V. and Fomina, I. 2008. Silicon in Agriculture (2008, South Africa) Role of silicon in plant defensive system. 74 pp
4. Bradbury, M. and R. Ahmad, 1990. The effect of silicon on the growth of *Prosopis juliflora* growing in saline soil. Plant and Soil 125: 71-74.
5. Brady, N.C. 1992. The nature and properties of soil. 10 ed. New York: Macmillan Publishing. 750 p.

6. Cabral, V., R. Silva, M. Brito, J de. Carbone M. Seron, H. 2008. Formas de Aplicação de Silicato de Cálcio e Magnésio na Cultura do Sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado1 *Pesquisa Agropecuária Tropical* v. 38, n. 4, p. 290-296, out./dez.
7. Carvalho, R. 1999. Interações silício-fósforo em Latossolo Vermelho- Escuro e Cambissolo cultivados com mudas de eucalipto. Lavras: UFLA, 89p. (Tesis - Doctorado).
8. Corrales, I, Ch. Poschenrieder y J. Barceló. 1997. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize root. *Plant Soil* 190: 203-209.
9. Cocker, K.M.; Evans, D.E.; Hodson, M.J. 1998. The amelioration of aluminium toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or in plant mechanism? *Physiologia Plantarum*, v.104. 608 - 614 pp.
10. Datnoff, L.E.; Snyder, G.H.; Korndörfer, G.H. 2001. Silicon in agriculture. *Studies in plant science*. Amsterdam: Elsevier, 403p.
11. Danoff, L. y Rodrigues, Á. 2005. The Role of Silicon Suppressing Rice Diseases. APSnet Featur, The American Phytopathological Society. (En línea). Consultado 25/01/2010. Disponible en <http://www.apsnet.org>.
12. Epstein, E. 1994. The anomaly of Silicon in Plant Biology. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 91: 11- 17.
13. Epstein, E. y A. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants, principles and perspectives. Second edition. Sinauer Associates, Sunderland. 400 p.
14. Espinosa, J. S.F. Fijación de Fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. Ecuador. (En línea). Consultado el 2011/05/11. Disponible en <http://www.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf>.
15. Fassbender, H. y M. Muller. 1967. Uso de enmiendas silicatadas en suelos altamente fijadores de fosfatos. El efecto de enmiendas de metasilicato de sodio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Ed. UNDP, Turrialba, Costa Rica. 375 p.
16. Fassbender, H. y Bornemisza, E. 1994. Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2da ed. Costa Rica. pag 9.
17. Fertiandino, Delcorp S.A., Fertilizantes edáficos. (En línea). Ecuador. Consultado 17/11/2010. Disponible en [www.fertiandino.com](http://www.fertiandino.com)
18. Flórez, Javier. 2009. El milagro del Silicio. (En línea). Consultado el 2011/05/08. Disponible en <http://elmilagrodelsilicio.blogspot.com/>

19. Guerrero, R. y T. Cabrera. 1972. Estado y fijación del fósforo en suelo volcánicos del sur de Colombia. Segundo panel sobre suelos volcánico de América, ICA, Universidad de Nariño y OEA. 89 p.
20. Hasing, F. 2007. Impacto de las Aplicaciones de un Mineral Bio-activo sobre Parámetros Agronómicos y Fitosanitarios en Plantas de Banano del Grupo Cavendish, Variedad Williams a Nivel de Laboratorio e Invernadero. Tesis de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. Escuela Politécnica del Litoral. Ecuador. 144 p.
21. Heine, G. 2005. Silicon Nutrition and Resistance against *Pythium apahanidermathum* of *Lycopersicon esculentum* and *Momordica charantia*. Universidad Hannover. Hannover, Germany. pp 1 - 15
22. Hodson, S. 1989. Physiology of Plants. Second edition. Academic Press, Toronto. pp. 44-49.
23. Hodson, M. y D. Evans. 1995. Aluminum/silicon interactions in higher plants. *Expl. Bot.* 46(2), 161-171.
24. Leite, P.C. 1997. Interação silício-fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação. Viçosa: UFV. 84p. (Tesis - Doctorado). Universidade Federal de Vicosá.
25. Liang Y. C., Q. R. Shen, Z. G. Shen, and T.S. Ma. 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars *J. Plant Nutr.* 19: 173-183.
26. Liang, Y., Q. Chen, Q. Liu, W. Zhang, and R. Ding. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology.* 160(10): 1157-1164 pp.
27. Liang, Y., Sun, W. y Romheld, V. 2005. Effects of Foliar and Root Applied Silicon on the Enhancement of Induced Resistance to Powdery Mildew in *Cucumis sativus*. *Plant Pathology.* 54: 678 – 685.
28. Lopes, J., Evangelista, A., Fortes, C., Pinto, J., Furtini, A., Magalhães de Souza, R. 2010. Calagem, Silicatagem e doses de Fósforo no Crescimento e Nutrição mineral de estilosantes. *Pesq. Agropec. Trop., Goiânia*, v. 40, n. 2, 150-158 pp, abr./jun.
29. Ma, J.F.; Sasaki, M.; Matsumoto, H. 1997. Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. *Plant and Soil*, v.188, 171 - 176 pp.
30. Ma. J.F., N. Mitani, S. Nagao, S. Konichi, K. Tamai, T. Iwashita, and M. Yano. 2004. Characterization of the Silicon Uptake System and Molecular Mapping of the Silicon Transporter Gene in Rice. *Plant Physiol.* 136: 1-6.

31. Miramontes, B., Arroyo, L., Alva, M., Espiricueta, T. 2004. Efecto del metasilicato de sodio sobre el crecimiento del cultivo de chícharo. Terra Latinoamericana. Vol. 22. Núm. 2, abril – junio 2004, 169 – 174 pp. Universidad Autónoma Chapingo. México.
32. Matichenkov, V. and D.V. Calvert. 2002. Silicon as a beneficial element for sugarcane. J. Am. Soc. Of Sugarane Technologist 22:21-30
33. Matichenkov. V. 2006. Silicon. Russian Academy of Sciences. Pushchino, Russia. 561 - 562 pp
34. Mengel, K. 1991. Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag Jena. Deutschland. 466 S.
35. Mengel, K.; Kirkby, E.A. 2001. Principles of plant nutrition. 5.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 849 p.
36. MSN Encarta. 2010. Online Encyclopedia. Consultado en 11/11/2010. Disponible en <http://encarta.msn.com>
37. Mundo Verde, 2011. Fertilizante orgánico. Ecuador. (En línea). Consultado el 2011/05/11. Disponible en <http://www.mundoverde.com.ec/pages/productos/fossil-shell-agro.htm>.
38. Novais, R. F.; Smyth, T. J. 1999. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV. 399 p.
39. Orejuela, J. 2010. Evaluación de la Aplicación de varias dosis de ácido monosilísico en la producción del cultivo de Arroz, Var. INIAP 15. Previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. Escuela Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil – Ecuador. 94 p
40. Okuda, A. y E. Takahashi. 1961. The mineral nutrition of the rice plant. Symp. Intern. Rice Research Inst. pp. 123-146.
41. Plaster, 2000. La Ciencia de Suelo y su Manejo. Editorial Paraninfo. Madrid-España. 411 p
42. Poudel, D.D., D.J. Midmore y L.T .West. 1999. Soil development and fertility characteristics of a volcanic slope in Mindanao, the Philippines. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1258-1273 pp
43. Quero E. 2007. Silicio en la Protección de las Plantas. División de Investigación del Instituto Superior de Urapan. Michuacan – México. (En línea). Consultado 21/02/2011. Disponible en [http://loquequero.com/portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=15&Itemid=1](http://loquequero.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=1).

44. Quero, E. 2008. Silicio en la Producción Agrícola. Instituto Superior de Uruapan. México. (En línea). Consultado 20/02/2011. Disponible en [http://loquequero.com/portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=12&Itemid=2](http://loquequero.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=2).
45. Quero, E. y V. A. Cárdenas. 2007 Nueva tecnología para incrementar la producción agrícola tecnificada y tradicional y mejorar la calidad agrícola de los suelos. Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Uruapan, Michoacán, México. 13pp
46. Rajj, B. van. 1991. *Fertilidade do solo e adubação*. Editora Agronómica Ceres, Piracicaba, Brasil. 343p.
47. Raven, J. A. 2001. Silicon transport at the cell and tissue level. pp. 41-55. *In*: L.E. Datnoff, G. H. Snyder, and G.H. Kornodorfer. (eds). Silicon in agriculture. Studies in plant science, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
48. Rogalla, H. and V. Römheld. 2002. Role of leaf apoplast in silicon – mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant, Cell and Environment*. 25: 549 – 555 pp.
49. Roy, A.C.; Ali, M.V.; Fox, R.L.; Silva, J.A. 1971. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latosols. *In*: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION, Honolulu, 1971. Proceedings. New Delhi: University of Hawaii. 805-815 pp.
50. Salvant, N., G. Snyder y L. Danoff. 1997. Silicon management and sustentable rice production. *Adv. Agr.* 58, 151-199.
51. Sawarkar, M. y B. Pathak. 1985. Effect of silicate and phosphate application on nutrition of maize. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 33, 110-115 pp.
52. Smyth, T.J.; Sanchez, P.A. 1980. Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an Oxisol on phosphorus sorption and ion retention. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, 500-505 pp.
53. Wikipedia, 2011. Oxisol. (En Línea). Consultado el 2011/05/13. Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Oxisol>
54. Yoshida, S. 1969. Effect of silica and nitrogen supply on some leaf characters of the rice plant. *Plant and Soil*, v.31, 48-56 pp.