

CIENCIA DE FRONTERA

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS AL SERVICIO DE LA MILPA, AL SERVICIO DEL CAMPO

EDGAR QUERO GUTIÉRREZ



CIENCIA DE FRONTERA

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS AL SERVICIO DE LA MILPA, AL SERVICIO DEL CAMPO

EDGAR QUERO GUTIÉRREZ



AGRICULTURA

iniqap



Producción
y Bienestar

CIENCIA DE FRONTERA.

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS AL SERVICIO DE LA MILPA, AL SERVICIO DEL CAMPO

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (SADER)

Municipio Libre 377, Sta. Cruz Atoyac, Benito Juárez, 03310 Ciudad de México, CDMX

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS (INIFAP)

Av. Progreso 5, Col. Barrio de Santa Catarina; Del. Coyoacán. C.P. 04010

INSTITUTO DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO RURAL MAYA, A.C.

Joaquín Romo 54, Miguel Hidalgo Ira Secc, Alcaldía Tlalpan, 14410. circomaya77@gmail.com

Esta publicación no tiene fines lucrativos. Únicamente fines educativos y de divulgación

SUBSECRETARÍA DE AUTOSUFICIENCIA ALIMENTARIA DE LA SADER

Víctor Suárez Carrera

Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria

José Atahualpa Estrada Aguilar

Director general de Organización para la Productividad

Carmina Enciso Sánchez

Directora general de Apoyos Productivos Directos

Rolando Herrera y Saldaña

Director general de Autosuficiencia Alimentaria

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS (INIFAP)

Luis Ángel Rodríguez del Bosque

Director general

Rafael Ariza Flores

Director del Centro de Investigación Regional. Pacífico Sur

INSTITUTO DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO RURAL MAYA, A.C.

Lorena Paz Paredes

Directora general

Rosario Cobo González

Subdirectora

COORDINADORES:

Soluciones Soild4+ SA de CV

Gloria Estela Terán Sarabia

Tania Quero Terán

Víctor Suárez Carrera

Gerardo Antonio Soberano Aguilar

Lourdes Rudiño Lugo

Diseño: **CAJA**

TIPOGRAFICA

Primera edición: 2024

CIENCIA DE FRONTERA.

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS AL SERVICIO DE LA MILPA, AL SERVICIO DEL CAMPO

se terminó de imprimir en el mes de junio de 2024 en los talleres de A+C Diseño y Arquitectura.

Se imprimieron 1 000 ejemplares más sobrantes para reposición.

Impreso y hecho en México / *Printed and made in Mexico*

ÍNDICE

EDGAR QUERO, UN CIENTÍFICO PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN AGROECOLÓGICA Víctor Suárez Carrera	9
PRÓLOGO Gloria Estela Terán y Tania Quero Terán	15
INTRODUCCIÓN	19
I	
EL PH Y SU IMPORTANCIA EN EL MANEJO DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	24
SILICIO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	31
MANEJO DEL SILICIO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	40
PREPARACIÓN DE COMPOSTA CON UN ENFOQUE MINERAL	49
BIOLOGÍA DEL SILICIO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS	54
SILICIO EN LA PROTECCIÓN DE LAS PLANTAS	66
REMINEERALIZACIÓN DE SUELOS CON MATERIALES RICOS EN SILICIO MPASI	75
FERTILIZACIÓN PARA EL CRECIMIENTO GENERATIVO EN CULTIVOS BAJO INVERNADERO	83
EL FLUJO DE SILICIO EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS Y SU IMPORTANCIA EN EL DESARROLLO Y LA PRODUCTIVIDAD: CASO CULTIVO DEL MAÍZ	94
NUTRICIÓN CON SILICIO Y SUS APLICACIONES A CULTIVOS A CIELO ABIERTO Y EN AGRICULTURA PROTEGIDA: UN PEQUEÑO RECORRIDO POR LA NATURALEZA	101
FERTILIZACIÓN LUMÍNICA Y CARBÓNICA EN INVERNADEROS	154
LA BIOSILICIFICACIÓN, PROCESO BIOLÓGICO FUNDAMENTAL EN LA PRODUCTIVIDAD VEGETAL	169
REGULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA Y NUTRIENTES EN LOS TEJIDOS VEGETALES	179
ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD DEL SUELO Y LA NUTRICIÓN BIODINÁMICA	189
MANEJO SUSTENTABLE 4M-MAS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PRIMARIA	202
SILICIO EN LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS	222

II

NAN-O-FERT® BIOMA MICROBIANO PARA EL DESARROLLO PROGRESIVO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS	228
O ₄ MAS®: MINERAL PRIMARIO PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA SUSTENTABLE	237

III

AGROECOSISTEMA MAÍZ CON TECNOLOGÍA APROPIADA (TA) PARA EL MANEJO DEL PATRIMONIO SUELO	242
MANEJO DEL CULTIVO DE MAÍZ CON TECNOLOGÍA APROPIADA BASADA EN CONOCIMIENTOS	256
SOIL4 ⁺ : MANEJO SUSTENTABLE DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PRIMARIA	284
DE LA ENERGÍA CUÁNTICA A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE A TRAVÉS DE BIOMOLÉCULAS-LIXIVIADO ANTIOXIDANTE: “VACUNA”	336

IV

MANEJO SUSTENTABLE DEL PATRIMONIO SUELO EN EL CULTIVO DE MAÍZ	362
---	-----

EDGAR QUERO, UN CIENTÍFICO PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN AGROECOLÓGICA

Víctor Suárez Carrera

Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

El doctor Edgar Quero Gutiérrez (1952-2020) fue un científico precursor de la revolución agroecológica en México. Produjo un original e invaluable legado de conocimientos teóricos, experimentales y prácticos vinculados a la construcción de un nuevo paradigma científico-técnico que contribuyó a la superación del obsoleto y contraproducente paradigma de la revolución verde.

En este libro se han recopilado los saberes de un científico mexicano comprometido con el desarrollo de una ciencia de frontera, orientada a la creación de un nuevo paradigma para la agricultura mexicana y mundial. Su trabajo abrió un camino luminoso para la descolonización y emancipación de las limitaciones epistemológicas, científicas, tecnológicas y socioeconómicas impuestas por la revolución verde.

El doctor Quero destacó al romper con el modelo de la superespecialización del conocimiento científico, apostando por un enfoque transdisciplinario, interdisciplinario y holístico. Dominó diversos campos de la ciencia aplicados a la práctica agronómica de los campesinos, convencido de que sólo así se podía comprender la complejidad de los sistemas de producción agroalimentarios del siglo XXI.

Fue un científico multifacético y un “científico de huarache”, como diría el maestro Efraín Hernández Xolocotzi, un científico con conciencia, ética y compromiso social. Admiraba profundamente el conocimiento agrícola de las culturas mesoamericanas y de sus herederos contemporáneos.

Se identificaba con el glifo maya de la milpa, llevando este símbolo en su mente y corazón, esforzándose por retribuir con conocimientos a los campesinos. Declaraba que sus descubrimientos científicos pertenecían a los mexicanos y que su ciencia era pública, construida con recursos y procesos colectivos. Trabajaba no sólo por la soberanía alimentaria, sino también por la soberanía tecnológica de México.

El doctor Quero fue un científico versátil, moviéndose con facilidad desde el campo de la ciencia de frontera hasta el surco y el laboratorio, pasando por conferencias científicas, capacitaciones y diálogos con campesinos. Estudió, dominó y aplicó diversas disciplinas científicas, incluyendo bioquímica, fisiología vegetal, biología molecular, nutrición vegetal, microbiología de suelos, bioquímica del silicio y microscopía electrónica.

Entre sus herencias y grandes contribuciones destacan:

1. Concebir la agricultura como un proceso de cosecha de energía solar y preservación del suelo.
2. La comprensión de los fenómenos complejos de la biogeoquímica de los suelos agrícolas y su manejo práctico para el restablecimiento del equilibrio de los ciclos físico-químico-biológicos de los suelos, para incrementar la productividad y resiliencia de los cultivos sin agroquímicos.

3. La comprensión de la bioquímica del silicio y su importancia decisiva en la dilución, disponibilidad y transporte de nutrientes del suelo desde la rizosfera a toda la planta.

Resaltó la importancia del silicio en la productividad y en la resiliencia de cultivos frente a ataques de insectos, al inducir el engrosamiento de las paredes celulares de las hojas y el desarrollo de una mayor cantidad de tricomas con mayor capacidad de expeler terpenos y repeler a insectos.

Un descubrimiento excepcional del doctor Quero fue la importancia del silicio en la formación de fitolitos, receptores lumínicos en las hojas, lo que permite incrementar la captación de luz solar y hacer más eficiente la transformación fotosintética de la energía solar. Los estudios y aplicaciones prácticas del silicio le valieron el que se conociera al doctor como el “padre del silicio”.

4. Destacó la importancia del conocimiento y manejo del potencial de óxido de reducción (ORP) de los suelos, materia orgánica, microorganismos, agua y en general todos los medios e insumos productivos. Esta innovación ha resultado esencial para la captación almacenamiento y disponibilidad de energía en los procesos metabólicos de los suelos y cultivos. El doctor Quero demostró que no bastaba con equilibrar el pH y la conductividad eléctrica, con incrementar el porcentaje de la materia orgánica en los suelos y aumentar la cantidad, diversidad y actividad de los microorganismos funcionales para equilibrar los suelos y disponer de condiciones óptimas para los cultivos.

El doctor Quero mostró que si el potencial de óxido reducción estaba en los rangos de oxidación; es decir, en condiciones de pérdida de energía, en lugar de aportar energía a los procesos metabólicos la consumían. Asimismo, evidenció la importancia del potencial de óxido reducción como un elemento esencial para el equilibrio y manejo de los suelos, por lo que se hace indispensable medir el potencial de óxido reducción de los suelos y, en su caso, llevarlos a rangos de reducción, es decir, de ganancia y acumulación de energía para estar en capacidad de sostener mejores y más eficientes procesos metabólicos en los cultivos.

Este conocimiento derivó, entre otras aplicaciones prácticas, en la utilización de un dispositivo portátil para medir el potencial de óxido reducción de suelos, bioinsumos, tejidos, etcétera. Dicho medidor de ORP se ha incorporado en el paquete de dispositivos analíticos móviles de las y los técnicos agroecológicos del programa Producción para el Bienestar en su

componente de acompañamiento técnico. Podemos afirmar que hoy en día no hay técnico agroecológico que se respete que no tenga consigo todos los días en su trabajo de campo un medidor de ORP.

5. La investigación de los procesos biogeoquímicos de los suelos y los cultivos a través de la microscopía de última generación fue ampliamente utilizada por el doctor Quero asumiendo que debía utilizarse la tecnología de punta para demostrar sus hallazgos, aprender a manejar complejos de elementos y a medir su presencia o ausencia en suelos, agua y tejidos, afirmando que había que rechazar las fórmulas, los llamados paquetes tecnológicos.

Creía que la investigación científica de procesos complejos debía dar como resultado procesos prácticos sencillos y simples al alcance de los campesinos. En ese sentido, el doctor Quero impulsó el establecimiento del laboratorio de análisis y microscopía de última generación en el Colegio de Michoacán, primero, y en Pachuca, Hidalgo, con la Fundación Produce estatal en sus últimos años, laboratorio que dirigió justamente hasta hace un año antes de su partida.

Además de sus contribuciones científicas, el doctor Quero fue un gran educador y formador de campesinos, técnicos y profesionistas. Era apasionado del diálogo con los agricultores, aprendiendo y enseñando desde el surco. Las organizaciones campesinas lo buscaban y veneraban por su capacidad pedagógica y entrega a la enseñanza, convencido de que a los campesinos había que entregarles conocimientos, no fertilizantes ni dinero.

El mejor homenaje que podemos rendir al doctor Quero es estudiar, aplicar y masificar su filosofía y conocimientos, impulsando la transición agroecológica en nuestros sistemas de producción agropecuaria y pesquera, y construyendo un sistema agroalimentario justo, saludable, sustentable y competitivo.

Los decretos del presidente Andrés Manuel López Obrador sobre la prohibición de la siembra comercial de maíz transgénico y la eliminación gradual del glifosato y otros plaguicidas altamente peligrosos marcaron un punto de inflexión hacia la revolución científico-tecnoló-

gica de la agricultura del siglo XXI a la que tanto contribuyó el doctor Quero. El doctor Quero siempre estuvo en contra de la agricultura con agroquímicos, promoviendo alternativas sustentables. Su legado nos demuestra que es posible avanzar hacia una agricultura sin agrotóxicos ni transgénicos, centrada en la vida y el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Desde la Subsecretaría de Autosuficiencia Alimentaria de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural rendimos homenaje a un gran científico original, descubridor de conocimientos científicos de frontera y comprometido con la soberanía alimentaria, nuestra independencia tecnológica y el desarrollo de un campo con campesinos y campesinas, con justicia y transición agroecológica, sin transgénicos ni agrotóxicos.

Hoy, en estas páginas, divulgamos su pensamiento, fórmulas y conocimientos, con el fin de dejar en manos de México una invaluable herencia para la soberanía alimentaria, transición agroecológica y la transformación del sistema agroalimentario y nutricional.

PRÓLOGO

“No soy igual a nadie, soy un científico de frontera y vine a romper paradigmas”. Así se definía de manera rebelde Edgar Quero Gutiérrez, quien, previo a su deceso el 21 de mayo de 2020, se vio en dos situaciones límite que lo confrontaron con la muerte y que sirvieron para que él, antes reservado y celoso de sus hallazgos, se decidiera a abrir las puertas de su conocimiento a todo aquel que quisiera tomarlo, haciendo un llamado particular a los jóvenes, a los estudiantes, y al conjunto del campesinado mexicano, hacia el cual sentía su mayor compromiso.

“El conocimiento tiene que ser plausible, entendible, y llegar lo más lejos posible”, dijo entonces. El tiempo corrió rápido y ya no dio tiempo al doctor Quero a clasificar y recopilar todos los documentos que quería compartir ordenadamente. Por tanto, un legado fundamental para su hija Tania fue precisamente el pedido de asumir esa misión: dar coherencia al conocimiento y divulgarlo.

De allí el surgimiento de este libro *Ciencia de frontera. Innovaciones tecnológicas al servicio de la milpa, al servicio del campo*, que se edita de manera conjunta entre la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y la familia Quero Terán.

Es un libro-manual que, si pudiera resumirse en una o dos frases, éstas serían: fórmulas para que México alcance la autosuficiencia y la soberanía alimentaria y que los campesinos abandonen la dependencia de

los agroquímicos por medio de la práctica agroecológica. O, en todo caso: cómo producir más con menos.

El doctor Edgar Quero Gutiérrez fue un extraordinario científico que entregó gran parte de su vida, de su talento y de su corazón a la investigación del comportamiento de las plantas y el suelo y a desarrollar tecnologías de medición, diagnóstico y de impulso productivo en el maíz, hortalizas, frutas y también en la acuicultura.

Es reconocido como pieza clave, ineludible, en el nuevo paradigma del campo mexicano y mundial, el paradigma de la transición agroecológica. Realizó sus estudios de licenciatura en Química en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México. Obtuvo una maestría en Ciencias en Biología Molecular por la Universidad de California en Los Ángeles y obtuvo un doctorado en la misma universidad en Fisiología Vegetal.

Al doctor Quero lo llamaron durante mucho tiempo “el loco del silicio”, apodo que, luego de su fallecimiento, devino en “el padre del silicio” o “el padre de la bioquímica del silicio”.

¿Por qué esos sobrenombres? Porque él, orgullosamente de raíces zapotecas, sentía un gran interés, tal vez obsesión, por la visión maya de la agricultura y de la milpa. Acudió a El Colegio de Michoacán a observar pinturas rupestres, visitó espacios mayas a los cuales entran sólo los arqueólogos: se coló por su deseo de aprender de la cosmogonía de esa cultura y se afanó tanto que dominó la lectura de jeroglíficos.

Fue entonces que, al leer y escudriñar documentos de los mayas, encontró el jeroglífico de la milpa, y también encontró el del silicio, situación que lo llevó a buscar el silicio dentro de las plantas y fue así que comenzó su incursión en la microscopía electrónica y electroscopía de rayos X.

Él decía: “necesito elementos, elementos científicos que sustenten los mecanismos del silicio en las plantas”. Estos procesos científicos están ampliamente plasmados en este libro.

Su incursión en la sabiduría maya ocurrió sustentada en la idea de que el conocimiento se expresa de múltiples maneras y que hay momentos de poner el freno y mirar atrás, pues para brincar al futuro, uno debe ver y revisar el pasado.

Así, el doctor Quero fue el científico mexicano que introdujo el conocimiento general sobre el papel que juega el silicio en el incremento de la productividad en el cultivo del maíz y profundizó en el conocimiento del papel de este mineral en el ancestro del maíz, el teocintle.

Desafortunadamente, al doctor Quero le tocó codearse con la muerte en varias ocasiones: una, al sufrir un accidente que originó la pérdida de sus dos piernas. Como ocurre con las personas sabias, de alma noble, estos acontecimientos, lejos de aplacarlo, le dieron más bríos y tomó la decisión de abrir su conocimiento a todo mundo.

Se acercó en las aulas a los jóvenes, a los estudiantes, y brindó un sinfín de conferencias, sobre todo con campesinos, pues él insistía siempre en la necesidad de otorgar a los más necesitados la forma de seguir produciendo más con menos, que ellos se adueñaran del conocimiento y de las innovaciones.

Sus esfuerzos no fueron en vano. Hoy sabemos que en cuatro años, con agroecología, los campesinos pueden reducir sus costos de producción en 80 por ciento, y tener mayores rendimientos, además de recuperar la salud de sus suelos, los suelos que, decía el doctor Quero, son el patrimonio principal de los productores: no la tierra, no las cosechas, no las ganancias, los suelos.

Además de la bioquímica del silicio, el doctor Quero desplegó su labor científica en los rubros de bioquímica, Fisiología y nutrición vegetal y microbiana.

Trabajó en diversas instituciones en investigación, innovación, transferencia y desarrollo tecnológico. Entre ellas, se cuentan la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el Centro de Investigación en

Química Aplicada, los Institutos Tecnológico Superior de Zamora y de Uruapan, El Colegio de Michoacán, las empresas Frexport y Dolomita Agrícola, y el despacho Cycasa.

El doctor Edgar Quero fue miembro de sociedades científicas de Estados Unidos, como la Asociación Americana de Química, Asociación Americana para el Avance de la Ciencia, Asociación Americana de Biólogos de Plantas. También de la Asociación Internacional de Ciencias Hortícolas, la Sociedad Americana de Ciencias del Suelo y la Asociación Mexicana de Microscopía.

Su acervo suma más de 40 publicaciones y dos libros, y fue distinguido como consultor del Banco Interamericana de Desarrollo.

El doctor Edgar Quero impulsó la creación de la carrera de Ingeniería en Industrias Alimentarias en institutos tecnológicos descentralizados. En la Universidad Autónoma Antonio Narro reformó la carrera de agronomía. También promovió la creación de tres laboratorios para el análisis y diagnóstico del patrimonio agrícola, agua, suelo y planta, dos en Michoacán, y uno en Pachuca, Hidalgo, en el Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología de Hidalgo (CENITTH), centro tecnológico de punta y con prestigio mundial propiedad de la Fundación Produce Hidalgo.

Desde 2015 y hasta el momento de su fallecimiento, el doctor Edgar Quero fue investigador del CENITTH.

Gloria Estela Terán y Tania Quero Terán

INTRODUCCIÓN

Este libro recopila documentos elaborados por el doctor Edgar Quero Gutiérrez. Su objetivo es brindar un panorama general del proceso de transición agroecológica y de los instrumentos metodológicos e insumos necesarios para desarrollarlo.

¿Qué es la agroecología?

Hay tres formas típicas de definir la agroecología: como un conjunto de prácticas agrícolas, como disciplina científica y como movimiento social.

La agroecología tiene mucho en común con otros enfoques de la agricultura sostenible. La agroecología es un movimiento social de una agricultura basada en conocimientos más que en insumos, que se centra en la producción de alimentos, y que hace el mejor uso de los bienes (recursos) y servicios de la naturaleza sin dañar estos recursos. Se emplea grandemente la captura y el reciclado de la energía solar. La agricultura prospera cuando trabaja con los ecosistemas locales, por ejemplo, mejorando la calidad del suelo y las plantas a través de la biomasa y la biodiversidad disponibles, en lugar de luchar contra la naturaleza con insumos químicos. Los agricultores agroecológicos buscan mejorar los rendimientos de alimentos para una nutrición equilibrada, fortalecer mercados justos para sus productos, mejorar ecosis-

temas saludables y construir sobre el conocimiento y las costumbres ancestrales.

Los promotores de la agroecología se esfuerzan por fomentar un paisaje saludable en el que produzcan y cultiven los alimentos y la fibra del mundo. Se guían por un espíritu de cultura y biodiversidad que presenta investigación aplicada centrada en los pequeños agricultores y políticas que protegen sus medios de vida. En todo el mundo, científicos, organizaciones de base, organizaciones no gubernamentales, consumidores, universidades y agencias públicas están trabajando con los agricultores para construir sistemas agroalimentarios sostenibles y nutritivos basados en la agroecología.

Ahora hay oportunidades sin precedentes para avanzar en la agroecología a nivel nacional y mundial. Con gran frecuencia, el sistema agroalimentario corporativo tiene impactos negativos en la salud de las personas, el medio ambiente y el bienestar de los agricultores y sus familias. La agroecología es reconocida como una estrategia de mitigación y adaptación para el cambio climático. Los consumidores exigen cada vez más alimentos saludables y una conexión estrecha con los productores de alimentos. Los movimientos sociales en todo el mundo, muchos con un liderazgo significativo de las organizaciones de mujeres e indígenas en un entorno familiar, se están uniendo en campañas para un sistema alimentario saludable basado en una ética ambiental y de derechos humanos. La demanda de agroecología está aumentando.

La agroecología es una combinación interdisciplinaria de agronomía, agricultura, ecología científica, economía y ciencias sociales. Integra prácticas como la agricultura orgánica, la agricultura regenerativa, algunos aspectos de la permacultura y, por lo tanto, contribuye al desarrollo sostenible.

La agroecología se caracteriza por una concepción global de los sistemas de producción agroalimentaria y se basa en las características naturales de los ecosistemas para amplificarlos. Esto ayuda a minimizar

las presiones sobre el medio ambiente y a preservar la capacidad de renovación de los servicios de los ecosistemas.

Historia de la agroecología: origen y evolución: El término agroecología apareció por primera vez en 1928 bajo la pluma del agrónomo estadounidense Basil Bentsen. Su comprensión de la agroecología se refería exclusivamente a la aplicación de métodos de ecología a los procesos de investigación agronómica.

Esta idea creció progresivamente durante los años 60s, 70s y 80s del siglo pasado. Para entonces, la noción de agroecosistema comenzó a transformarse en la idea de un ecosistema modificado por la actividad humana con fines de explotación.

En las décadas de 1990 y 2000, la agroecología se volvió mucho más global. Los agroecosistemas ahora se utilizan para comprender y definir todo el sistema de producción, distribución y consumo de recursos alimentarios, en todos sus componentes (agrícola, agronómico, económico, ambiental y social).

Hoy la comunidad científica está de acuerdo en que algunos problemas ecológicos se deben en parte a la agricultura intensiva: problemas tales como el uso masivo de pesticidas y la degradación de la calidad del suelo, la pérdida de biodiversidad, la homogeneización de los cultivos del suelo y los efectos del calentamiento global.

Cada vez más investigadores, activistas y agrónomos están abogando por una redefinición de los principios agrícolas de nuestra sociedad para producir un sistema agrícola más responsable y resistente. La agroecología trata de satisfacer esta necesidad porque apunta a producir un sistema agrícola más sostenible y ecológico.

Agricultura: las prácticas agroecológicas se basan en insumos y procesos ecológicos, así como en la provisión de servicios ecosistémicos. Las prácticas agroecológicas contribuyen a los diferentes objetivos de la agricultura sostenible: proporcionar alimentos suficientes para una

población mundial en crecimiento; que esos alimentos no sean perjudiciales para el medio ambiente y los recursos naturales; limitar el uso de energía no renovable, y garantizar la viabilidad económica de los agricultores y sus comunidades. La agricultura orgánica, la rotación diversificada de cultivos, el control biológico de plagas, los extensos sistemas agropastorales y la agrosilvicultura son ejemplos de métodos agrícolas que utilizan la agroecología.

Ciencia: Cada vez más, las disciplinas y redes científicas expresan preocupación por la disminución de los recursos finitos, como los combustibles fósiles, por cuestiones (relacionadas) como el cambio climático, el suelo, la biodiversidad, la salud y las costumbres.

Aunque “los negocios habituales” ya no son una opción, gran parte del pensamiento agrícola convencional se centra en retener el tipo de agricultura industrializada de alto insumo ejemplificada por ideas como “intensificación sostenible”.

Como disciplina científica, los estudios de agroecología son bastante holísticos: estudian los agroecosistemas a través de una lente interdisciplinaria que analiza cuestiones como la productividad, la estabilidad, la sostenibilidad y la equidad. Consideran cuestiones relacionadas con la agronomía, la ecología, la sociología, la economía y la política en todas las escalas relevantes, desde el nivel local hasta el global.

Movimientos sociales: muchas organizaciones, así como muchas personas poco conectadas, están trabajando hacia un futuro agroecológico de alimentos y agricultura. En términos generales, y tomadas en conjunto, pueden ser vistas como un movimiento social que trata de hacer que la agroalimentación conozca mejor los recursos y, por lo tanto, sea realmente sostenible a largo plazo.

I

EL PH Y SU IMPORTANCIA EN EL MANEJO DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

El pH es una variable universalmente empleada como parámetro de la calidad del agua y suelo. Sus valores permiten predecir la disponibilidad, solubilidad y movilidad de los elementos minerales, necesarios para el crecimiento y productividad de los cultivos. El pH, potencial de iones hidrógeno, es una medida cuantitativa de la cantidad de iones hidrógeno disueltos en el agua. Estos iones disueltos en el agua (H_2O) interactúan con los elementos minerales presentes en los fertilizantes y las partículas del suelo, compitiendo con las moléculas de agua para disolverlos. La molécula de agua pura, sin sales, es una sustancia polar, que al disociarse forma cargas iónicas positivas, $[\text{H}^+]$ (catión) y negativas, $[\text{OH}^-]$ (anión) en concentraciones iguales, base fundamental para la definición de la escala del pH.

A 25°C , la disociación del agua pura ocurre así, según la ley de acción de masas:



o bien

$$\frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} = 1 \times 10^{-14}$$

Dado que $[\text{H}_2\text{O}] = 1.0$, por convención se tiene que $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$, encontrando que el agua pura tiene una concentración de $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ mol/L}$. La actividad del ion hidrógeno es el parámetro empleado porque refleja directa o indirectamente el progreso de una reacción química que puede ocurrir en una solución acuosa y porque puede determinarse por métodos eléctricos simples, con un potenciómetro o medidor de pH. Por ello la actividad de iones hidrógeno comúnmente se expresa como el valor de pH, definido por: $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$ y por consiguiente el agua pura tiene un $\text{pH} = -\log_{10}[1 \times 10^{-7}] = 7.0$. Cuando la actividad de iones hidrógeno de una solución es más grande que 10^{-7} mol/L , el pH mostrará un valor entre 0 y 7, siendo una solución ácida, y cuando la actividad es menor que 10^{-7} mol/L , el pH mostrará un valor entre 7 y 14, siendo una solución básica. Estos fundamentos definen a la escala de pH que se muestra en la siguiente figura:



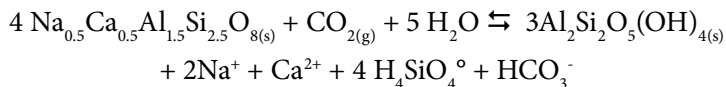
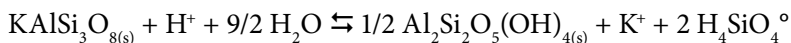
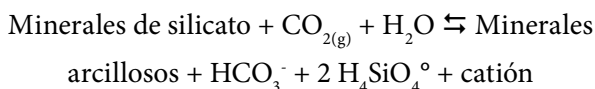
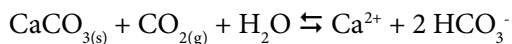
Como la concentración de iones $[H^+]$ y $[OH^-]$ definen el pH de una solución en el suelo y la capacidad de mantener en solución los minerales requeridos para la nutrición de los cultivos, es importante considerar qué elementos componen las partículas del suelo: arena, limo, arcilla, complejos minerales, materia orgánica y fertilizantes. En la siguiente tabla se muestra la relación del valor de pH y los principales minerales contenidos en suelos con actividad agrícola intensiva, colectados en Durango, Michoacán, Sinaloa, Sonora y Zacatecas:

Composición mineral de suelos agrícolas, realizado en una microsonda de dispersión de rayos X, acoplado a microscopio electrónico de barrido. Los valores están en porcentaje de peso seco									
Elemento 4.5-5.0		Intervalos de pH en la solución del suelo (2:1)							
		5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	
Oxígeno	O	54.33	55.49	57.58	56.29	58.38	60.72	58.17	59.27
Silicio	Si	13.49	14.16	16.26	18.38	19.71	19.51	20.67	20.81
Aluminio	Al	10.45	10.40	10.15	9.22	6.65	6.87	6.68	5.56
Carbón	C	9.52	11.92	8.96	8.67	9.42	7.87	8.55	10.08
Calcio	Ca	0.88	0.73	0.56	0.86	0.79	0.48	0.79	1.13
Fósforo	P	0.36	0.36	0.22	0.17	0.12	0.08	0.07	0.08
Hierro	Fe	5.34	5.05	4.23	3.99	2.16	1.80	2.03	1.05
Magnesio	Mg	0.38	0.35	0.29	0.53	0.73	0.63	0.63	0.39
Potasio	K	0.38	0.34	0.59	0.68	1.11	1.17	1.40	0.97
Titanio	Ti	0.59	0.56	0.45	0.44	0.23	0.21	0.22	0.15
Sodio	Na	0.41	0.28	0.33	0.48	0.53	0.52	0.57	0.47
Silicio/ Aluminio	Si/Al	1.29	1.36	1.60	1.99	2.96	2.83	3.09	3.74

En la tabla se observa el gradiente de mayor pH, mayor silicio y menor aluminio, y la relación silicio/aluminio varía de 1.29 a 3.74. Estas variaciones concuerdan con lo reportado por otros autores, cuando se refieren a la degradación y erosión del suelo. Asimismo, la concentración de aluminio y silicio en rocas ígneas es de 7.4 y 28.5%, respectivamente. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de degradación:

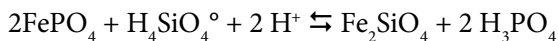
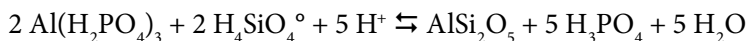
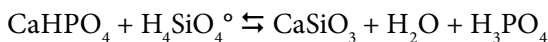


Asimismo, las reacciones químicas típicas que ocurren en este proceso de degradación del suelo son:



Estas reacciones muestran que, además de disolverse y solubilizarse los iones, potasio, calcio, sodio, etc., se forman concentraciones importantes de ácido silícico. Este ácido se convierte en el vehículo transportador de minerales al formar silicatos, de calcio, magnesio, zinc, etc., y a través de formar cadenas poliméricas de ácido silícico que a su vez pueden formar estructuras micelares. En las cadenas poliméricas se pueden crear gradientes de concentración, facilitando la movilización

de los minerales a los sitios donde ocurre la demanda. Por otro lado, el ácido silícico disuelve elementos importantes, como el fósforo, según las siguientes reacciones químicas:



Ácido silícico, un grupo de siete formas hidratadas de SiO_2 , con una fórmula general $[\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x}]_n$, que incluye a los siguientes ácidos silícicos: tetra, $\text{H}_2\text{Si}_4\text{O}_9$, meta-di, $\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, meta-tri, $\text{H}_4\text{Si}_3\text{O}_8$, meta, H_2SiO_3 , orto-tri, $\text{H}_8\text{Si}_3\text{O}_{10}$, orto-di, $\text{H}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ y orto, H_4SiO_4 . La última fórmula se escribe comúnmente como $\text{Si}(\text{OH})_4$. Los ácidos silícicos y aniones silicatos se polimerizan por medio de la formación de múltiples uniones Si-O-Si. La estructura polisilica puede ser lineal o cíclica y no es uniforme en tamaño. El silicio existe en la solución del suelo en concentraciones de 0.1 a 0.6 mol m^{-3} , como $\text{Si}(\text{OH})_4$ (dos órdenes de magnitud más alto que los macronutrientes como fósforo $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$). También es importante mencionar que las soluciones de silicatos muestran un pH básico y que el ácido silícico es soluble a pH entre 7.5 y 8.0, y a un pH menor a 7.0 es insoluble.

Aunque al silicio no se le considera un nutriente, este es removido anualmente por los cultivos en cantidades de 200 a 500 kg/ha. Las plantas emplean el silicio para transportar, en sus tejidos, minerales y compuestos orgánicos como los azúcares; asimismo, para formar estructuras poliméricas y cristalinas en la cutícula de las hojas, que permiten resistir estrés biótico y abiótico. Estructuras ricas en silicio que forman parte de las hojas son: fitolitos, tricomas y cadenas poliméricas presentes en las paredes celulares. Los tricomas son importantes para la liberación de compuestos con actividad fungicida e insecticida.

El silicio en el suelo tiene una concentración promedio de 250 g/kg y por hectárea de suelo cultivable se estima un contenido de 2,500 tone-

ladas, por lo que, para remover 500 toneladas de silicio a una demanda de 500 kilos por año, se requieren 1,000 cosechas o años. Por ello, las deficiencias se han notado de manera lenta, aunque en suelos donde además de la erosión biológica ocurre la hídrica, como en los climas tropicales, la productividad de los cultivos se ve severamente afectada por la falta de silicio y la alta concentración de aluminio.

Dado que el silicio puede reintegrarse al suelo a través de incorporar los residuos agrícolas, es posible establecer un ciclo biogeoquímico que permite la conservación del suelo y la productividad. Este ciclo se ilustra en la siguiente figura:



Por otro lado, para recuperar los niveles de silicio en el suelo, es posible aplicar a los cultivos minerales ricos en silicio, como el Silimotion®, el cual contiene calcio, magnesio, hierro, zinc, potasio y silicio. La aplicación de estos minerales puede realizarse en dosis de 1.0 a 2.0 ton/ha, en la zona radicular. Aplicaciones típicas en árboles frutales se muestran en las siguientes figuras:

Aplicación de minerales ricos en silicio en árboles frutales.



Aplicación de minerales ricos en silicio en el surco.



SILICIO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante y disperso en la corteza de la Tierra, la Luna y Marte, después del oxígeno (O₂).



En la corteza terrestre, excepto las formas inertes-cristalinas e insolubles del silicio: cuarzo, arena, cristales-minerales, zeolitas, en la naturaleza se encuentran formas biogeoquímicas activas de silicio, en la solución del suelo, como las derivadas del ácido silícico: monómeros,

ortosilícico, H_4SiO_4 y *metasilícico*, H_2SiO_3 , dímeros, trímeros, polímeros, coloides, agregados coloidales y el silicio amorfo sin estructura cristalina. Estos agregados se muestran en la figura siguiente:



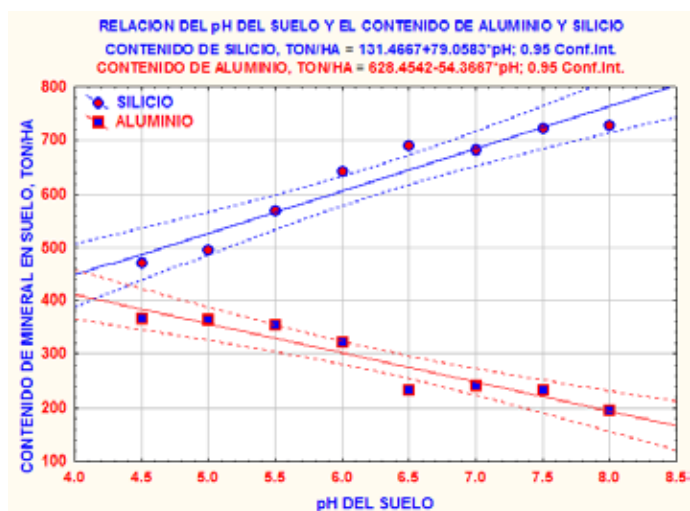
Adicionalmente, con la acción de agentes abióticos, temperatura, lluvia (agua) y el CO_2 disuelto en el agua en la forma de ácido carbónico ($\text{H}_2\text{CO}_3/\text{CO}_2$), actúan sobre los minerales arcillosos y liberan el ácido silícico a una concentración de 1 a 50 mg/kg. Al mismo tiempo liberan elementos minerales, y se forman silicatos de calcio, magnesio, potasio, zinc, hierro, incrementando grandemente la capacidad de intercambio catiónico de los suelos, y el pH del suelo se torna básico, en niveles de 7.5 a 8.5. En estas condiciones de pH y capacidad de intercambio catiónico, los suelos son altamente productivos. En estos suelos se encuentran de 100 a 200 mg/kg de estas formas de silicio soluble.

La riqueza mineral de suelos de diferentes regiones agrícolas del país se cuantificó mediante la espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, en un microscopio electrónico de barrido, equipado con una microsonda de rayos X. Estos suelos, clasificados por el pH de la solución, muestran en promedio la composición siguiente:

Composición mineral de suelos agrícolas, colectados en diferentes regiones del país. el análisis de los minerales se realizó con la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, en el laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Los datos se expresan en ton/ha, en un suelo típico franco, con una profundidad de 0.25 m.

pH Solución del Suelo	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
Oxígeno (O)	1901.55	1942.15	2015.30	1970.15	2043.30	2125.20	2035.95	2074.45
Silicio (Si)	472.15	495.60	569.10	643.30	689.85	682.85	723.45	728.35
Aluminio (Al)	365.75	364.00	355.25	322.70	232.75	240.45	233.80	194.60
Carbón (C)	333.20	417.20	313.60	303.45	329.70	275.45	299.25	352.80
Calcio (Ca)	30.80	25.55	19.60	30.10	27.65	16.80	27.65	39.55
Fósforo (P)	12.60	12.60	7.70	5.95	4.20	2.80	2.45	2.80
Hierro (Fe)	186.90	176.75	148.05	139.65	75.60	63.00	71.05	36.75
Magnesio (Mg)	13.30	12.25	10.15	18.55	25.55	22.05	22.05	13.65
Potasio (K)	13.30	11.90	20.65	23.80	38.85	40.95	49.00	33.95
Titanio (Ti)	20.65	19.60	15.75	15.40	8.05	7.35	7.70	5.25
Sodio(Na)	14.35	9.80	11.55	16.80	18.55	18.20	19.95	16.45

En la tabla se observa que el contenido de silicio y aluminio se relacionan con el pH de la solución del suelo. A medida que el pH pasa de suelo ácido a alcalino, el contenido de silicio se incrementa a una relación de 79.05 ton/ha por unidad de pH. Esto significa que cuando un suelo con un pH de 8.0 pasa a 4.0 se remueven del suelo aproximadamente 300 ton/ha de silicio elemental. Silicio que es removido por los requerimientos del cultivo y la erosión hídrica causada por la lluvia. Por otro lado, el aluminio se incrementa como consecuencia de la remoción del silicio. Esto se ilustra en la siguiente figura.



En la tabla también se observa que el incremento en la concentración de silicio va acompañado por una menor concentración de fósforo y de hierro, esto a consecuencia de que el ácido silícico solubiliza a estos induciendo su aprovechamiento por los cultivos.

Estas variaciones en la concentración del silicio también tienen efectos sobre diferentes procesos del suelo y en el crecimiento de microorganismos y plantas. En los ecosistemas terrestres, el ciclo biogeoquímico del silicio es más intenso que el ciclo del fósforo (P) y del potasio (K). Las raíces aparentemente liberan enzimas (“silicazas y silicateinas”) y compuestos orgánicos (ácido cítrico y protones hidrógeno (H^+)) que solubilizan el silicio presente en las arcillas, que provienen de las rocas y minerales cuando son intemperizados por las condiciones del medio ambiente como lluvia, temperatura, viento, y por las acciones mecánicas del manejo de suelos. Por lo que las raíces con alta capacidad de extraer silicio del suelo promoverán el mejor desarrollo de la canopia y en general de la planta. El silicio se encuentra presente en los tejidos de la planta en cuatro formas, que son la mineral, orgánica, polimérica y cristalina. Esta última se encuentra en la superficie de las hojas, pro-

porcionándole brillo y formando parte de la estructura de los tricomas y fitolitos, los cuales caen al suelo promoviendo el reciclado.

El uso agrícola intensivo y extensivo del suelo provoca el desequilibrio de nutrientes contenidos en este, dado que una parte significativa es removida por la cosecha, el desarrollo vegetativo del cultivo y de la maleza, la lixiviación y la erosión eólica e hídrica. El silicio, así como otros nutrientes, es extraído del suelo. La extracción de silicio activo de los suelos agrícolas por cada cosecha es en promedio de 40 a 300 kg/ha. Esto trae como consecuencia una disminución de silicio y un aumento del aluminio, causando un incremento en la acidez del suelo, tal como se ilustró anteriormente.

Los cultivos que extraen silicio con mayor intensidad son las gramíneas, que tienen además una alta eficiencia fotosintética. Uno de estos cultivos es la caña de azúcar, la cual produce más de 180 ton/ha en suelos con pH mayor a 7.5 y un contenido de silicio en el suelo mayor al 22%. Mientras que, en condiciones de suelo ácido con pH de 5.5 a 6.0 y un contenido de silicio de 16%, la producción es de 60 a 80 ton/ha.

El silicio juega un papel importante en la planta. Este elemento controla el desarrollo del sistema radicular y la asimilación y distribución de nutrientes minerales; también, incrementa la resistencia de la planta al estrés abiótico (alta y baja temperatura, viento, alta concentración de sales y metales pesados, hidrocarburos, aluminio, etc.) y biótico (insectos, hongos, enfermedades).

Como ejemplo de la presencia biológica del silicio, podemos mencionar que está presente en semillas de pistacho, avena, cebada y frijol en concentraciones de 1.4, 4.25, 2.42 y 1.20 g por kilo, respectivamente. En hojas, se encuentran concentraciones de 0.5 a 30 g por kilo.

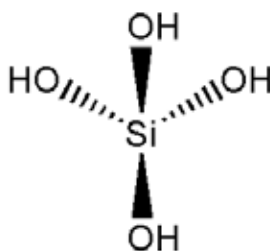
La mayor concentración de silicio en el suelo, y suministrar al suelo minerales ricos en silicio a través de los procesos de fertilización, permiten una solución económica y rentable para la producción agrícola, destacando lo siguiente:

1. El silicio incrementa la productividad y calidad de las cosechas agrícolas. Desde el año 1848, numerosos reportes de investigación y la producción comercial en campo han demostrado los beneficios al obtener cosechas superiores, mediante la fertilización con silicio, tal como se observa en la producción de arroz (15-100%), maíz (15-35%), trigo (10-30%), cebada (10-40%), caña de azúcar (55-150%), diversos frutales como el aguacate, mango, (40-70%), zarzamora, guayaba, hortalizas, jitomate, chile (50-150%), y otros, como el frijol, pastos forrajeros y agave. También se promueven beneficios al suelo para mantener una agricultura sustentable. La fertilización mineral con silicio tiene un doble efecto en el sistema Suelo-Planta. Primeramente, la nutrición con silicio al cultivo refuerza en la planta su capacidad de almacenamiento y distribución de carbohidratos requeridos para el crecimiento y producción de cosecha, y la autoprotección contra enfermedades causadas por hongos y bacterias, contra el ataque de insectos y ácaros y frente a las condiciones desfavorables de clima, al estimular el desarrollo y la actividad de estructuras poliméricas en la cutícula, los tricomas y fitolitos en la superficie de las hojas. En segundo lugar, el tratamiento del suelo con sustancias con silicio biogeoquímicamente activo optimiza la fertilidad del suelo a través de mejorar la retención y disponibilidad del agua, sus propiedades físicas y químicas y de mantener los nutrientes en forma disponible para la planta.
2. El silicio restaura el suelo degradado e incrementa su nivel de fertilidad para la producción agrícola. De 40 a 300 kg de silicio por hectárea de suelo cultivado son extraídos anualmente por las cosechas. La falta de ácidos monosilícicos y la disminución de silicio amorfo conducen a la destrucción de los complejos órgano-minerales, se acelera la degradación de la materia orgánica del suelo y se empeora la composición mineral. La aplicación de fertilizantes minerales con silicio es obligatoria para una agricultura sustentable y altamente efectiva en cualquier tipo de suelo.
3. El silicio incrementa la resistencia del suelo contra la erosión del viento y agua. La aplicación de silicio mineral al suelo remedia y restaura su estructura, incrementa la capacidad de retención de agua (de 30 a 100%) y la capacidad de intercambio catiónico, sobre todo en pH's mayores a 7.0. Se incrementa la estabilidad ante la erosión al promover la formación de agregados coloidales. El silicio ayuda al desarrollo del sistema radicular de la planta y puede incrementar la masa de raíces de un 50 a 200%, por lo que también estimula el amacoyamiento (mayor número de tallos por semilla).

4. El silicio incrementa la resistencia a la sequía en las plantas. La fertilización con silicio puede optimizar el aprovechamiento del agua de riego en un 30 a 40% y ampliar los intervalos del riego sin efectos negativos sobre las plantas. Adicionalmente al sistema irrigación-drenaje, la fertilización con minerales de silicio activo permite completar la rehabilitación de suelos afectados por sales, compactación y bajos niveles de pH.
5. El silicio neutraliza la toxicidad causada por el aluminio en suelos ácidos mucho mejor que el encalado. Existen cinco posibles mecanismos para la reducción de la toxicidad del aluminio por compuestos ricos en silicio, como la formación de ácidos silícicos –orto y meta–, coloides, polímeros de silicio y complejos aluminio-silicatos. El encalado tiene un solo mecanismo. Desafortunadamente, la aplicación de encalado y de dolomita fija al fósforo y transforma al fósforo disponible en no asimilable para la planta. Empleando materiales ricos en silicio para la reducción de la toxicidad del aluminio y optimización del pH, se mejora también la nutrición con fósforo, hierro, potasio y zinc, ya que el silicio activa el intercambio catiónico y la movilización de nutrientes.
6. El silicio aumenta la nutrición del fósforo en las plantas de un 40 a 60% e incrementa la eficiencia de la aplicación de roca fosfórica de un 100 a 200%. La fertilización con minerales ricos en silicio promueve la transformación del fósforo no disponible para la planta en formas asimilables y previene la transformación de fertilizantes ricos en fósforo en compuestos inmóviles. Fertilizantes de lenta liberación se pueden fabricar con materiales ricos en silicio.
7. El silicio promueve la colonización por microorganismos simbióticos (bacterias y hongos). El silicio mineral promueve la colonización de las raíces por algas, líquenes, bacterias y micorrizas, mejorando la fijación y asimilación de nitrógeno y fósforo, entre otros minerales.
8. El silicio reduce la lixiviación de fósforo, nitrógeno y potasio en las áreas de cultivo agrícola. El silicio, como mejorador, puede reducir la lixiviación de nutrientes en los suelos arenosos y guardarlos en una forma disponible para la planta, tales como coloides.
9. El silicio incrementa la resistencia de la planta a la salinidad. La fertilización con silicio puede aliviar el estrés causado por la salinidad en plantas cultivadas. Sin embargo, existen pocas hipótesis que expliquen el efecto del silicio sobre el estrés salino.

10. El silicio protege a las plantas contra el ataque de las enfermedades, hongos e insectos. La acumulación de silicio en los tejidos de la epidermis en forma polimérica, orgánica y cristalina permite proteger y fortalecer mecánica y bioquímicamente a los tejidos de la planta. El silicio se ha empleado eficazmente para controlar numerosas enfermedades causadas por hongos y ataques de insectos, tanto como los pesticidas y fungicidas, pero sin efectos negativos para el medio ambiente. La cantidad de tricomas se estimula de un 20 a un 80%.

Ácido ortosilícico, molécula, piedra angular de la agricultura.



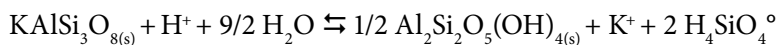
11. El silicio restaura áreas contaminadas por metales pesados e hidrocarburos. Los fertilizantes minerales ricos en silicio pueden neutralizar el efecto tóxico de metales pesados y restaurar la fertilidad de la tierra. En numerosos experimentos de invernadero y campo se demostró que materiales ricos en silicio pueden usarse como la parte integral de la nueva tecnología para la purificación y restauración de suelos contaminados con aceites y productos derivados de estos.
12. El silicio mejora el empleo de biosólidos. La mezcla de biosólidos, como el estiércol de ganado y compostas con minerales ricos en silicio activo, puede transformar la presencia de contaminantes activos y tóxicos en materiales inertes. Además, potencializa a los elementos minerales contenidos en ellos y reduce la lixiviación.
13. El silicio tiene acción sinérgica con el calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), zinc (Zn) y molibdeno (Mo). Los seis elementos presentan una acción sinérgica, optimizando el desarrollo del cultivo y producción de cosecha, también se mejora la vida media de las cosechas perecedoras.

14. El silicio forma parte de la estructura de los tricomas. En plantas de frijol, caña de azúcar, papa, chile y tomate, el silicio incrementa el número y tamaño de tricomas estructurales y glandulares, ya que forma parte de su estructura, y este puede ser el mecanismo por el cual el silicio mejora e incrementa la resistencia de los cultivos al ataque de insectos, hongos y bacterias.
15. El silicio aumenta la productividad en la horticultura. Hoy la agricultura mundial requiere anualmente unas 800 mil toneladas de fertilizantes minerales ricos en silicio para promover el desarrollo de una agricultura saludable y sustentable. Esto invariablemente ocurrirá en suelos con más de 700 ton/ha de silicio elemental y pH mayor a 7.5, donde ocurre también una alta capacidad de intercambio catiónico.

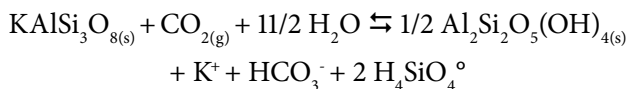
MANEJO DEL SILICIO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

REACCIONES EN UN SUELO PRODUCTIVO Y LA TECNOLOGÍA AGRÍCOLA

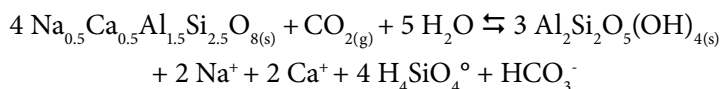
La intemperización de minerales, aluminio-silicatos a minerales arcillosos, es un ejemplo de reacciones incongruentes que ocurren activamente en un suelo agrícola. Teniendo efecto a partir de que los minerales del suelo reaccionan con el agua de riego o lluvia y componentes del ambiente, produciendo compuestos que pasan a la solución del suelo más la arcilla-degradada sólida, con un contenido menor de silicio y cationes, calcio, potasio, etc. Estas reacciones de intemperización se pueden escribir en términos de la disponibilidad de agua (H_2O), protones hidrógeno (H^+), bióxido de carbono ($\text{CO}_{2(\text{g})}$) y ácido carbónico (H_2CO_3), provenientes del medio ambiente del suelo, y que la aplicación de tecnologías agrícolas puede regular con precisión y oportunidad. Otro factor que promueve las reacciones de intemperización es el tamaño de las partículas de arcilla y la temperatura. Por ejemplo, la intemperización del mineral feldespato llamado ortoclasa ($\text{KAlSi}_3\text{O}_{8(\text{s})}$) al mineral arcilloso llamado caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_{4(\text{s})}$) es una importante reacción en suelos de clima húmedo. Nosotros podemos escribir la reacción en términos de H^+ y agua (H_2O), como sigue:



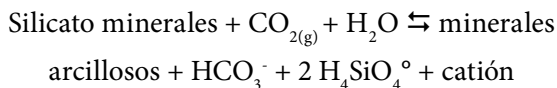
Donde los productos son el ácido ortosilícico que va a componer la solución del suelo y la arcilla erosionada. La misma reacción escrita en términos de $\text{CO}_{2(g)}$ atmosférico puede ser:



Para un diferente feldespato llamado plagioclase, el cual contiene una igual fracción de Na y Ca, la reacción que ocurre es:



Formando enseguida monómeros y polímeros de silicatos solubles, los cuales pueden formar coloides, incrementando significativamente la capacidad de intercambio catiónico y riqueza nutritiva del suelo. De manera general, estas reacciones se pueden escribir como sigue:

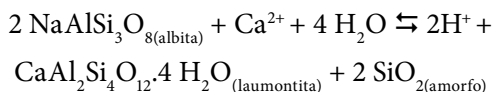


Esta reacción es estimulada por las tecnologías de riego, que proveen una humedad constante en el suelo, como lo hace el riego presurizado de goteo y la microaspersión. Otra técnica importante es la inundación de suelos, pero esta tiene poca aplicación, dadas las limitaciones en la disponibilidad y aprovechamiento del agua. Así también, la aplicación de carbonatos y de materia orgánica a través de compostas estimulará la formación de $\text{CO}_{2(g)}$ y H_2CO_3 . Estas técnicas agrícolas apoyan la activación y degradación de las arcillas liberando silicio en la forma de ácido ortosilícico, un ácido muy débil, manteniendo una concentración entre 20 y 40 ppm en la zona radicular, a lo largo del desarrollo del cultivo, aunque dependiendo de la temperatura y concentración de silicio en los materiales minerales que componen el suelo, pueden ocurrir en la solución incluso 150 ppm de este ácido. El ácido ortosilícico

será asimilado por la planta por el sistema radicular, y se satisfarán las demandas del cultivo, que en promedio son similares a las de potasio y nitrógeno, como se muestra en la **tabla 1**, para los cultivos de arroz, caña de azúcar y papa, correspondiendo en promedio para cada uno un 25% de los elementos minerales solubles asimilados a través de las raíces.

Cuando se practica una agricultura intensiva, la cantidad de silicio en los minerales del suelo se reduce significativamente, por lo que es importante aplicar técnicas de remineralización permanentemente, revirtiendo este proceso de degradación. En la **tabla 2** se muestran algunas de las diferencias entre suelos productivos y erosionados, de acuerdo con información obtenida en regiones agrícolas del país. Note que la relación silicio/aluminio es indicadora de la capacidad productiva del suelo, esto es, en general una relación de 4/1 será la adecuada, mientras que relaciones cercanas a uno son obtenidas en suelos erosionados y de baja productividad.

Cuando un suelo ya está degradado, la práctica del encalado puede resultar contraproducente, como lo ilustra la reacción:



En esta, ocurre un mayor proceso de degradación; cuando se adiciona de manera irracional el catión (Ca^{2+}), se liberan protones (H^+), que proporcionan un suelo ácido y se libera también silicio amorfo insoluble, dadas las condiciones de acidez del suelo.

Para mantener la productividad y sustentabilidad de los sistemas agrícolas, es importante comprender el papel del silicio en estos. Se establece que las prácticas de irrigación con precisión, para mantener un nivel constante de humedad en los suelos, en combinación con otras técnicas que conservan la humedad en el suelo, como son el acolchado de suelos con materiales plásticos y esquilmos agrícolas como en la labranza mínima, el aporte de materia orgánica a través de compostas

y el empleo racional de carbonatos permiten la presencia de silicio en la forma de ácido ortosilícico ($\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$) soluble en los suelos, proporcionando una alta movilidad de nutrientes minerales y la formación de coloides. Estas acciones propician que el cultivo sea productivo, con una mejor capacidad de adaptación al estrés biótico y abiótico.

Adicionalmente, es importante seguir con las convenciones y requerimientos de las transformaciones de minerales alumino-silicatos.

- En las reacciones que involucran Al-silicatos, el Al es conservado; dado que este no se disuelve apreciablemente, pero es transferido en el producto sólido de la reacción.
- El exceso de silicio forma ácido ortosilícico ($\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$), el cual no se disocia a menos que el ambiente sea muy básico ($\text{pH} > 7$), por lo que, en suelos ricos en silicio, se debe racionalizar la aplicación de ácidos a través de los sistemas de riego.
- Elementos de metales alcali y tierras alcalinas forman iones en solución.
- Cualquier ion H^+ , consumido por la reacción se origina del medio ambiente.
- Después de que la reacción ha sido balanceada con respecto al Al, Si y cationes solubles, nosotros balanceamos el oxígeno por adición H_2O tanto como sea necesario.
- Después, balanceamos el hidrógeno por la adición H^+ tanto como sea necesario.
- La ecuación puede ser balanceada en términos de cargas eléctricas.

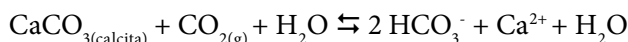
Nota: El oxígeno no puede ser balanceado por $\text{O}_{2(\text{gas})}$ a menos que la reacción envuelva óxido-reducción. En el balanceo de reacciones óxido-reducción los electrones que son intercambiados tienen que ser balanceados primero antes de completar un balance de materia y cargas eléctricas.

MANEJO DE SUELOS PARA LA MEJOR PRODUCTIVIDAD

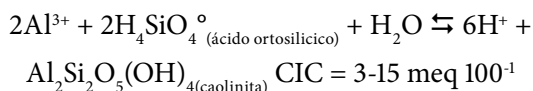
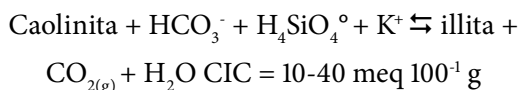
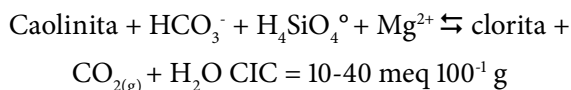
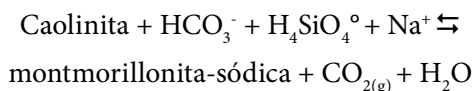
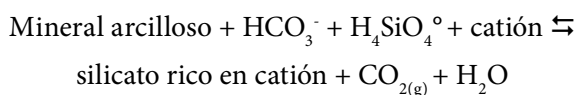
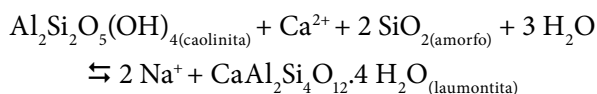
El diseño de técnicas agrícolas para la remineralización de suelos, con la consecuente reversión de la baja productividad y la alta susceptibilidad de los cultivos al estrés biótico y abiótico, se apoya en la ley de acción de masas. Esta establece una demanda de H_2O , cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+}), $\text{CO}_{2(\text{g})}$, ácido ortosilícico ($\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$) y silicio

amorfo ($\text{SiO}_{2(\text{amorfo})}$), tal como se presenta en las siguientes reacciones, expresadas en términos de actividades:

La calcita o minerales de carbonato de calcio ($\text{CaCO}_{3(\text{calcita})}$) en la presencia de $\text{CO}_{2(\text{g})}$ son importantes proveedores del ácido carbónico y calcio requeridos para iniciar el proceso de remineralización, de acuerdo con la reacción siguiente:



Enseguida, es importante incrementar la disponibilidad de $\text{SiO}_{2(\text{amorfo})}$ y $\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$ y continuar con las reacciones que involucran la presencia de materiales arcillosos degradados o no, tal como se ve aquí:



Como se observa, el silicio en la forma de $\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$ se incorpora a las arcillas, incrementando la capacidad de intercambio catiónico, además de que mejora la capacidad de movilización de nutrientes y su retención catiónica, impidiendo la lixiviación de minerales solubles y

en estado iónico. Adicionalmente, el pH del suelo se torna alcalino a consecuencia de los silicatos.

Las técnicas de manejo de suelos, para la mejora de los niveles de silicio en el suelo, son a través de:

El agua de riego puede ser una buena fuente de silicio disuelto; para ello, es importante conocer la concentración de todos los elementos minerales contenidos en ella. De manera general, las aguas obtenidas de manantial o pozo, próximas a regiones volcánicas, contienen concentraciones que permiten aportar al cultivo entre 10 y 20 kilos de silicio en la forma de ácido ortosilícico, por cada lámina de riego de 50 mm.

Aplicación de compostas, sobre todo aquellas provenientes de la actividad ganadera y enriquecidas durante su proceso con minerales ricos en silicio. Estos materiales pueden aportar de 40 a 60 kg de silicio por tonelada de composta. Además de otros nutrientes importantes, como son el nitrógeno, potasio, carbono, etc.

La aplicación de fertilizantes minerales de nueva generación, como el Silimotion que, por sus diferentes presentaciones, pueden aportar de 90 a 150 kilos de silicio amorfo, biogeoquímicamente disponible, por tonelada de producto.

La recuperación y aprovechamiento de esquilmos agrícolas son también una fuente de silicio, sobre todo aquellos obtenidos a partir del cultivo de arroz y caña de azúcar, que pueden contener hasta un 4% de silicio.

El suelo puede disponer de 800 ton/ha de silicio, en la capa arable de 25 cm, en suelos francos altamente productivos. Se estima que niveles por debajo de 300 ton/ha son improductivos, o bien ya no permiten que la actividad agrícola sea rentable ni de subsistencia.

A manera de ilustración, se muestra en la **tabla 3** la composición promedio de fuentes que aportan silicio a la actividad agrícola. Asimismo, en la **figura 1** se muestra el flujo y posibles aportes de silicio al cultivo.

Tabla 1. Extracción de nutrientes minerales por diversos cultivos, con un buen rendimiento de campo y sanidad de cultivo. Los datos son el promedio de diferentes evaluaciones, propias, nacionales e internacionales y se expresan en kg/ha.

Elemento	Arroz	Caña Azúcar	Papa
Cobre (Cu)	0.15	0.71	7.87
Boro (B)	0.15	0.39	
Zinc (Zn)	0.20	0.85	8.62
Manganeso (Mn)	2.00	3.24	6.15
Hierro (Fe)	3.00	16.60	24.69
Azufre (S)	5.00	49.00	24.88
Magnesio (Mg)	13.87	48.00	74.35
Calcio (Ca)	14.29	77.00	118.26
Fósforo (P)	14.84	24.00	26.00
Cloro (Cl)	25.00	1.00	48.83
Nitrógeno (N)	110.00	168.00	379.68
Potasio (K)	129.50	218.00	348.00
Silicio (Si)	250.00	248.00	168.72

Tabla 2. Características entre suelos erosionados y productivos, tomando como cultivo indicador a la caña de azúcar por tener mayor información disponible.

Suelo	pH	Silicio, %	Aluminio, %	Caña Azúcar, ton/ha
Erosionado	4.0	14.0	12.0	60-70
Productivo	7.5	22.0	5.0	180-240

Tabla 3. Composición mineral de suelo, agua, composta y fertilizantes de nueva generación ricos en silicio. El análisis de los minerales se realizó con la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, en el laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Los datos se expresan en promedio de materiales colectados en diferentes regiones agrícolas.

Elemento	Suelo Agrícola		Demanda	Agua Riego	Composta Ganado + Minerales	Mineral Silimotion®		
	Limitado	Bueno				Normal	Plus	Fósforo
	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Kg/Ln 50 mm	Kg/ton	Kg/ton	Kg/ton	Kg/ton
Cobalto (Co)					0.15			
Cobre (Cu)					0.68	0.30		
Cromo (Cr) K					0.70			
Manganeso (Mn)					0.98	1.73	2.10	
Zinc (Zn)					1.43	21.20	26.93	20.57
Molibdeno (Mo)				0.27	1.70	0.50	5.80	
Sodio (Na)				1.31	7.22	9.53		
Azufre (S)				0.18	12.97	1.15		2.20
Nitrógeno (N)				0.34	16.60			
Cloro (Cl)	12.60	2.45	-10.15	0.65	11.62	1.03	1.80	1.85
Titanio (Ti)	20.65	7.70	-12.95		0.88	0.40		
Fósforo (P)	14.35	19.95	5.60		24.57	0.47		46.50
Magnesio (Mg)	13.30	22.05	8.75	2.63	10.02	22.53	16.63	9.47
Calcio (Ca)	30.80	27.65	-3.15	1.39	90.77	116.23	63.40	134.70
Potasio (K)	13.30	49.00	35.70	0.47	29.12	12.27	20.33	13.80
Hierro (Fe)	186.90	71.05	-115.85	0.47	7.30	23.37	36.10	37.33
Aluminio (Al)	365.75	233.80	-131.95	0.51	12.12	19.23	30.73	23.60
Carbón (C)	333.20	299.25	-33.95	2.51	278.80	133.90	114.03	102.40
Silicio (Si)	472.15	723.45	251.30	12.17	55.13	90.63	147.43	101.47
Oxígeno (O)	1901.55	2035.95	134.40	25.58	451.57	546.50	541.23	508.17

Figura 1. Flujo de silicio en sistemas agrícolas.



PREPARACIÓN DE COMPOSTA CON UN ENFOQUE MINERAL

Cuando el planeta Tierra se formó, se produjo un material sólido, minerales primarios, similares a los encontrados en la superficie de la Luna y Marte, cuya composición promedio es oxígeno 40-45%, silicio 18-25%, hierro 12-15%, potasio 8%, calcio 3-5%, magnesio 3-6%, azufre 25%, aluminio 2-5%.

En la Tierra, dada la presencia de agua (H_2O), ácido sulfhídrico (H_2S), oxígeno (O_2), nitrógeno (N_2) y bióxido de carbono (CO_2), se presentó un proceso geoquímico, induciendo en la superficie del suelo la formación de un caldo acuoso rico en las formas solubles de ácido ortosilícico (H_4SiO_4), las iónicas o silicatos y las primeras formas poliméricas, llegando a construir coloides.

Este caldo mineral rico en ácido ortosilícico recibió el producto de las reacciones que ocurrieron en el ambiente gaseoso de la atmósfera de la Tierra, las formas primitivas de carbohidratos, ácidos orgánicos y aminoácidos. Ello, gracias a la alta concentración de O_2 , H_2O , CO_2 , H_2S , N_2 , radiación solar y descargas eléctricas. Este proceso indujo en el caldo nutritivo del suelo las primeras reacciones biopoliméricas y consecuentemente las primeras formas de vida. Estas formas primitivas de vida fueron los microorganismos; bacterias, hongos y algas, los cuales

continuaron actuando sobre los minerales primarios, incrementando la presencia mineral soluble, y permitieron la formación de suelos ricos en minerales solubles, silicatos, carbón orgánico y nitrógeno, para soportar el desarrollo de formas de vida superiores, como los vegetales.

La acción geoquímica y microbiológica es un proceso biogeoquímico que promueve el flujo de carbón y silicio en los sistemas biológicos en la Tierra.

El carbón en los sistemas biológicos proporciona estructura y permite el flujo de energía, para mantener la actividad de los biopolímeros (enzimas, proteínas, ácido desoxirribonucleico, etc.), mientras que el silicio permite el flujo de cationes y proporciona estructuras, sólidas, salinas y coloides, para la protección de los sistemas biológicos contra el estrés abiótico y biótico. La acción biótica del silicio es a través de suprimir el desarrollo de organismos antagónicos, no provoca directamente la muerte.

La agricultura orgánica, como se denomina actualmente a la producción sustentable, es un proceso biogeoquímico, donde ocurre una serie de reacciones presentes desde el origen de la vida en la Tierra, entre residuos vegetales ricos en carbón (44% C), minerales primarios ricos en silicio (25% Si) y un consorcio de microorganismos (66 billones de individuos por 100 gramos de suelo).

En los sistemas biológicos sanos ocurre un alto flujo de carbón y silicio, mientras que la ocurrencia de concentraciones limitantes de estos elementos propicia el deterioro de ellos, baja adaptación y productividad y sobrepoblación de organismos no deseables, lo que deriva en el estrés biótico, llegando a ocurrir la supresión total del desarrollo de los cultivos.

LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO

En diez gramos de un suelo agrícola fértil encontramos una población microbiana que iguala a la población mundial humana (más de 6.6 billones). Un kilogramo de suelo puede contener 1, 10 y hasta 500 billones de bacterias, actinomicetos y hongos, respectivamente. Mientras que

la fauna puede ser de 500 millones en el mismo kilogramo de suelo. A esta biomasa microbiana debe adicionarse la contribución de las raíces de las plantas, ya que ellas se encuentran dispersas en un metro de profundidad y pueden representar 600 km, que, sumados a la longitud de las hifas de los hongos, proporcionan una amplia distribución de la flora y actividad microbiana. También, como parte de la biomasa microbiana, encontramos 25 millones de algas. Formando la fauna del suelo están los protozoarios, nemátodos, ácaros, colémbolos y la lombriz de tierra, como los más representativos.

Los microorganismos del suelo juegan un papel esencial en la catálisis de las reacciones de óxido-reducción. Los exudados liberados por los microorganismos y las raíces sanas son importantes en la actividad y en el ciclo de los minerales que componen el suelo: ciclos biogeoquímicos. De los exudados encontrados en la rizosfera, los ácidos orgánicos: ácido carbónico (H_2CO_3), fórmico (HCOOH), acético (CH_3COOH), oxálico (HOCCOOH), tartárico y cítrico, han sido bien caracterizados. De estos, el que mayor contribución tiene en el ciclo biogeoquímico de los minerales es el carbónico.

Una representación de la “biomasa” microbiana típica del suelo a 15 cm de profundidad, en número y masa, se muestra en la siguiente tabla:

Presencia de organismos en el suelo. Los datos se expresan con base en un suelo seco.

Organismos	No./g	Kg/ha
Microflora		
Bacterias	500*106	1,600
Actinomicetos	10*106	1,600
Hongos	1*106	2,000
Algas	25*103	320
Fauna		
Protozoarios	30*103	380
Nemátodos	1.5	120
Ácaros	5	80

Colémbolos	8	80
Lombriz de tierra	1*10 ³	800
Otra fauna		500

En un suelo agrícola típico, la mayoría de los microorganismos permanecen en la misma posición y sólo se mueven cuando son perturbados por el crecimiento de la raíz, movimiento de agua, actividades de cultivo, lombrices y escarabajos. Su número puede caer dramáticamente en condiciones adversas y puede cambiar a formas resistentes y permanecer en estado latente por largos periodos de tiempo.

Cuando las condiciones son adecuadas, el número puede crecer rápidamente. Un ejemplo de esto ocurre cuando ellos viven próximos a las raíces y estas proveen un flujo continuo de carbohidratos, energético vital para el desarrollo de los microorganismos. La acción de los gusanos y las prácticas de cultivo estimulan la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica (MO). Por otro lado, es importante considerar que la actividad microbiana sobre los diferentes tipos de material orgánico tiene diferentes requerimientos de tiempo, que van de meses a varios cientos de años.

Tiempo de recambio del material orgánico del suelo.

Material orgánico	Recambio, años
Desperdicios/Residuos de Cosecha	0.5 a 2.0
Biomasa microbiana	0.1 a 0.4
Macro-organismos	1.0 a 8.0
Fracción	1.0 a 15.0
Humus estable	20 a 1,000

Al descomponerse, la materia orgánica tiene como producto principal al bióxido de carbono (CO₂), pero es el residuo sólido o “humus” el que mayor importancia tiene en la actividad química y física del

suelo. Aunque el CO₂ es también un gran promotor de las reacciones de óxido-reducción que ocurren con los minerales primarios ricos en silicio. Un resumen de los efectos de la flora microbiana se muestra en la tabla siguiente:

Organismos	Ciclo mineral	Estructura del suelo
Microflora (bacterias + hongos)	Catabolismo de la materia orgánica. Mineraliza e inmoviliza los nutrientes. A través de la liberación de CO ₂ , solubiliza el silicio de los minerales primarios.	Produce compuestos orgánicos que permiten la formación de agregados en el suelo. Partículas de hifas intervienen en la interacción entre agregados del suelo.
Microfauna	Regula la población bacteriana y fúngica. Modifica el recambio de nutrientes.	Puede afectar la estructura de agregados a través de la interacción con la microflora.
Mesofauna	Regula la población fúngica y la microfauna. Modifica el recambio de nutrientes. Fragmenta los residuos vegetales.	Produce pellets fecales. Crea bioporos. Promueve la humificación.
Macrofauna	Fragmenta los residuos vegetales. Estimula la actividad microbiana	Mezcla partículas minerales y orgánicas. Redistribuye la materia orgánica y microorganismos. Crea bioporos. Promueve la humificación. Produce pellets fecales.

BIOLOGÍA DEL SILICIO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

En virtud de que el silicio no ha sido definido científicamente como un elemento esencial para la nutrición de los cultivos agrícolas, su participación en el metabolismo y fisiología de los vegetales no se consideró importante en el desarrollo productivo y sustentable. Con base en las experiencias en la producción, en el manejo de sistemas agrícolas y en las respuestas fisiológicas observadas en la nutrición con minerales ricos en silicio, se establecen los siguientes beneficios:

El silicio se encuentra en la naturaleza, principalmente en forma sólida, en estado oxidado (SiO_2), ocupando del 70 al 90% de los componentes sólidos del suelo; siendo el segundo componente de los minerales primarios; no se encuentra en su forma elemental (Si^0) en los sistemas naturales. Está presente en la solución del suelo entre 50 y 150 ppm como ácido ortosilícico $[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ y las formas iónicas $[\text{H}_3\text{SiO}_4^-]$, $[\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}]$, $[\text{HSiO}_4^{3-}]$ y $[\text{SiO}_4^{4-}]$, que forman sales solubles (silicatos) con los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , K^+ , Na^+ , etc.

El agua es el disolvente universal, y esta propiedad es mejorada substancialmente cuando en ella ocurre el silicio en la forma de $[\text{H}_4\text{SiO}_4]$. Por eso los nutrientes catiónicos son más solubles, mejor asimilados y fácilmente transportados a través de los tejidos. Finalmente, cuando

se concluye el transporte de nutrientes, el silicio queda libre. Como el silicio apoya la nutrición de las hojas, la concentración de este mineral es alta en la epidermis, donde forma estructuras sólidas e insolubles.

El silicio contenido en el suelo varía, según la explotación de este por la agricultura y la erosión causada por el clima, ocurriendo concentraciones en la capa arable de 25 cm, desde 350 ton/ha hasta 780 ton/ha. Se detecta que una concentración de 400 ton/ha limita la productividad y sanidad de cultivos y cosechas; consecuentemente, el silicio forma parte del desarrollo sustentable.

Las moléculas de silicio fisiológicamente activas son solubles, estables y asimilables, y estas incluyen a monómeros, dímeros, polímeros y coloides de ortosilícico $[H_4SiO_4]$, potencializando su función en los vegetales cultivados contra el estrés biótico y abiótico, al formar oligómeros con polímeros de carbohidratos, proteínas y sus iones con los cationes de calcio, magnesio, potasio, zinc, hierro, así como sus formas sólidas de cuarzo.

La epidermis, tejido que forma una barrera protectora entre el medio ambiente y las células que componen los diferentes tejidos de la planta, contiene del 10 al 50% de silicio, formando estructuras sólidas y flexibles, con funciones biológicas específicas. Algunas de estas formas son los fitolitos y tricomas. Las diferentes formas de tricomas permiten desde la asimilación de nutrientes hasta la liberación de compuestos que repelen y suprimen el desarrollo de bacterias, hongos, insectos y ácaros que perjudican el desarrollo de los cultivos. Así también, cuando el cultivo se desarrolla adecuadamente, el silicio estimula la simbiosis con microorganismos e insectos. Además, en las células de la epidermis, el silicio puede estar en forma polimérica y coloidal, lo cual permite mantener disponibles agua y minerales, manteniendo turgente al tejido foliar. Por otro lado, los fitolitos (forma biológica del cuarzo) permiten aprovechar mejor la luz, ya que ellos la dispersan y eliminan el efecto de la luz ultravioleta. Todo esto permite una protección física y química, que resulta en resistencia y adaptación al estrés biótico y abiótico.

En plantas como el maíz, trigo, arroz, caña de azúcar, cebada y avena, los fitolitos pueden cubrir del 20 al 70% de la epidermis en el haz de la hoja, limitando la pérdida de agua por transpiración y el efecto de las heladas, ya que los fitolitos actúan como aislantes térmicos.

Adicionalmente, las diferentes formas de silicio soluble en los tejidos vegetales permiten una mejor movilidad de minerales, carbohidratos, metabolitos secundarios y proteínas. Ello, a través de inducir la formación de tejido vascular del tipo traqueidas y por interacción química iónica, mejorando substancialmente los procesos metabólicos involucrados en la productividad, por lo que los minerales ricos en silicio mejoran la precocidad de las cosechas e incrementan el diámetro de tallos y ramas.

Para la mejor producción, es importante que la disponibilidad en cantidad, oportunidad y calidad de silicio se proporcione desde el inicio del desarrollo de la planta. Por ello los minerales ricos en silicio deben aplicarse antes de la germinación y durante todo el desarrollo del cultivo, ya que las estructuras silícicas se renuevan y forman constantemente, sobre todo en los sitios de activo crecimiento foliar y radicular.

Los minerales ricos en silicio estimulan el desarrollo de la flora microbiana del suelo –bacterias, hongos y algas–, de tal manera que es posible incrementar la asimilación de nitrógeno mediante el proceso de simbiosis entre plantas y bacterias, frijol-rhizobium, maíz-azospirillum, y por acción individual de algas y bacterias fijadoras de nitrógeno.

El sistema radicular tiene capacidad de detectar la presencia de silicio, desarrollando diferentes estrategias metabólicas y fisiológicas para asimilarlo. Se observa un abundante desarrollo de tricomas absorbentes radiculares (raíz secundaria), tejido de conducción del tipo xilema, las traqueidas, y se activa la capacidad de almacenamiento de reservas de carbohidratos (mayor diámetro de tallos y ramas), en la forma de almidón o fructanos en células especializadas, principalmente contenidas en la médula del tallo.

El silicio es requerido durante los primeros estadios del desarrollo de frutos, maíz, papa, algodón, manzana, durazno, fresa, etc., proporcionando adecuados niveles de minerales y carbohidratos. Ello permite una mejor sanidad y vida de anaquel de los frutos percederos.

BIÓXIDO DE CARBONO DE ORIGEN BIOLÓGICO Y AMBIENTAL SOBRE LOS MINERALES DEL SUELO

En general, las reacciones geoquímicas y biogeoquímicas de los minerales primarios que componen el suelo pueden ser descritas como congruentes o incongruentes. En las reacciones congruentes, el total de los minerales va a la solución. En reacciones incongruentes, el mineral inicial es degradado y modificado y convertido a un mineral sólido secundario, liberando a la solución del suelo cationes $[A^+]$, ion bicarbonato $[H_2CO_3]$ y ácido ortosilícico $[H_4SiO_4]$. A continuación, se describen algunas de las que ocurren en el suelo agrícola.

La intemperización de $CaCO_3(s)$ es considerada como una reacción congruente.



Mientras que la intemperización de minerales de aluminio-silicatos a minerales arcillosos es un ejemplo de reacciones incongruentes.

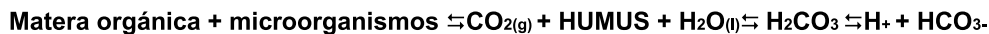


Nosotros podemos escribir estas reacciones geo-biogeoquímicas en términos de la disponibilidad de protones hidrógeno (H^+), bióxido de carbono ($CO_{2(g)}$) o ácido carbónico (H_2CO_3). Por ejemplo, la solubilización de los minerales más comunes en la corteza terrestre, el feldespato del tipo ortoclasa ($KAlSi_3O_8(s)$) y el mineral arcilloso llamado caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4(s)$), son una importante reacción en suelos de clima húmedo.

Nosotros podemos escribir la reacción en términos de H^+ como sigue:



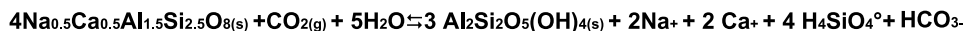
El protón H^+ es proveído por la reacción



Por lo que la misma reacción puede ser escrita en términos de $CO_2(g)$ atmosférico o producto de la degradación de la materia orgánica (MO):

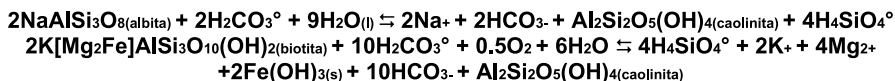
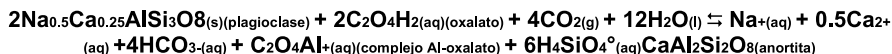
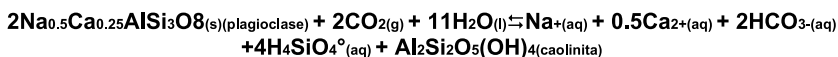
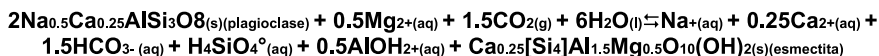


Para un diferente feldespato llamado plagioclase, el cual contiene una igual fracción molar de Na y Ca, nosotros podemos escribir:



Puede observarse que en general, durante la intemperización, un estructurado aluminosilicato (feldespato) es convertido en un degradado aluminosilicato sólido (arcilla), un catión-pobre, cationes y ácido orto-silícico que van a la solución, un $CO_{2(g)}$ que es consumido y un HCO_3^- que es producido. La concentración liberada del ion bicarbonato es equivalente a la liberación de los cationes, de acuerdo con la reacción estequiométrica.

A continuación, se muestran las reacciones geo-biogeoquímicas de diferentes minerales de mayor abundancia en la corteza terrestre:



Por otro lado, el ácido ortosilícico puede presentar las reacciones siguientes, tanto en el sistema suelo como en el sistema planta.



Hay muchos tipos de minerales en las rocas y ellos presentan reacciones geo-biogeoquímicas similares con diferente susceptibilidad. La estabilidad de los minerales ante estas reacciones es de acuerdo con el siguiente gradiente:

Mineral máfico (minerales con Mg y Fe): olivina < piroxeno < anfíbol < biotita mineral félsico: Ca-plagioclase < Ca-Na plagioclase < Na-Ca plagioclase < Na plagioclase < K-feldespato, moscovita, cuarzo. En la siguiente tabla se muestra la composición típica de algunos minerales.

Composición elemental de algunos minerales.

Mineral	Fórmula empírica típica de minerales	Porcentaje modal
Olivina	$(\text{Mg}1.6\text{Fe}2+0.4(\text{SiO}_4))$	
Piroxeno	$(\text{Mg}0.85\text{Ca}0.62\text{Fe}0.48\text{Al}0.05\text{Na}0.02\text{Ti}0.02)(\text{Si}1.96\text{Al}0.04)\text{O}_6(\text{s})$	0.6
Ortopiroxeno	$(\text{Mg}1.08\text{Fe}0.71\text{Ca}0.17\text{Al}0.03\text{Ti}0.01\text{K}0.12)(\text{Si}1.99\text{Al}0.01)\text{O}_6(\text{s})$	
Clinopiroxeno	$(\text{Mg}0.78\text{Ca}0.74\text{Fe}0.48\text{Na}0.02\text{Al}0.06\text{Ti}0.02)(\text{Si}1.96\text{Al}0.04)\text{O}_6(\text{s})$	
Anfíbol	$(\text{Ca}1.85\text{Na}0.35\text{K}0.12)(\text{Mg}2.33\text{Fe}2.14\text{Al}0.65)(\text{Si}6.94\text{Al}1.06)\text{O}_{22}(\text{OH})_2(\text{s})$	0.9
Biotita	$\text{K}1.96\text{Na}0.01(\text{Fe}2.84\text{Mg}2.48\text{Al}0.51)\text{Al}_2.18\text{Si}_5.82\text{O}_{20}(\text{OH})_4(\text{s})$	<0.1
Plagioclase	$(\text{Na}0.77\text{Ca}0.17\text{K}0.02)(\text{Al}1.19\text{Si}2.82)\text{O}_8(\text{s})$	2.2
K-Feldespato	$(\text{K}0.91\text{Na}0.08\text{Ca}0.01)(\text{Al}1.03\text{Si}2.96)\text{O}_8(\text{s})$	10
Cuarzo	SiO_2	76.4
Epidotis	$\text{Ca}_2.0\text{Al}_2.2\text{Fe}0.8\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})(\text{s})$	0.7
Clorita	$(\text{Fe}2.38\text{Mg}2.09\text{Al}1.43\text{Ti}0.01\text{Ca}0.01\text{K}0.01)(\text{Si}2.73\text{Al}1.27)\text{O}_{10}(\text{OH})_8(\text{s})$	1.0

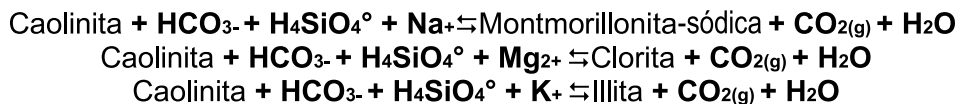
Entre los minerales máficos, la olivina reacciona mucho más rápido que la biotita. El cuarzo y K-feldespatos son más lentos que los minerales plagioclase. Tal susceptibilidad es clara cuando se observan rocas en el campo.

La reacción de minerales ricos en carbonato consume un $\text{CO}_{2(g)}$ de la atmósfera y produce un ion CO_3^{2-} proveniente del mineral secundario (que puede expresarse como dos HCO_3^-), y puede ocurrir más de dos veces tanto como mucho HCO_3^- como Ca^{2+} esté presente en el mineral, esto es $\text{HCO}_3^- = 2\text{Ca}^{2+}$. Por ejemplo, nosotros podemos estimar el porcentaje de $\text{CO}_{2(g)}$ neutralizado por silicato reaccionado geo-bio-geoquímicamente, siguiendo un modelo simple. Nosotros asumimos que, en promedio, los minerales de silicato producen un HCO_3^- de cada $\text{CO}_2(g)$ consumido, con la liberación de $2 \text{H}_4\text{SiO}_4$ (e.g. silicato + $\text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + 2\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$).

También, como reacciones geoquímicas del suelo, se observa la reacción reversible, esto es que es posible enriquecer a los minerales primarios con silicio y cationes liberando $\text{CO}_{2(g)}$. Por ello se ha propuesto la remineralización de suelos agrícolas y de los sedimentos del océano, ocurriendo con esto una gran demanda de los iones HCO_3^- , SiO_2 , Mg, K, Na). Esta reacción reversa puede ser escrita en forma general, para una condición de 25°C , 1 atmósfera de presión y en equilibrio con silicio amorfo y ácido ortosilícico, de la siguiente manera:

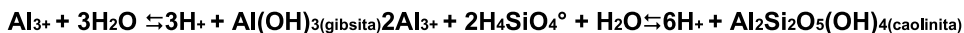
Mineral arcilloso altamente degradado + HCO_3^- + $\text{H}_4\text{SiO}_4^\circ$ + catión $\rightleftharpoons$ silicato rico en catión + $\text{CO}_2(g) + \text{H}_2\text{O}$

Las reacciones propuestas para remover los excesos de iones y remineralizar los suelos y minerales son:



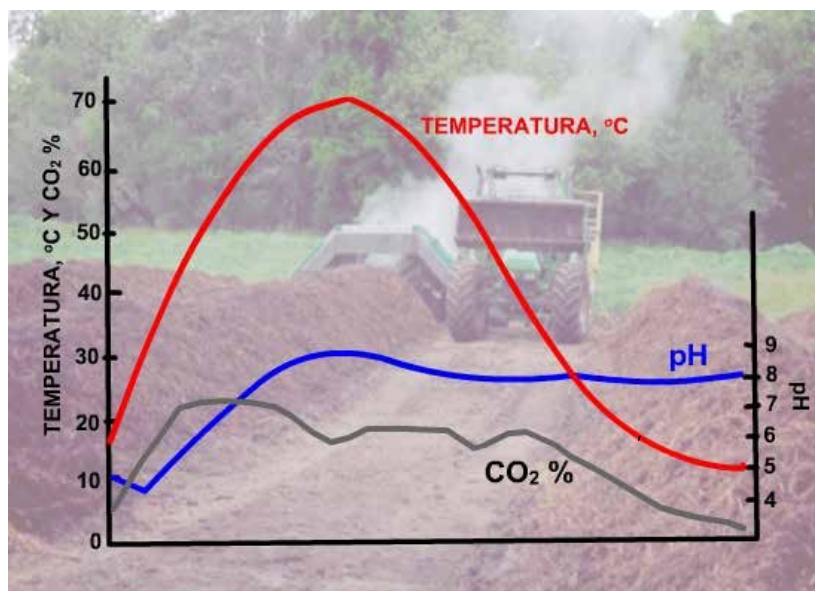
El HCO_3^- puede obtenerse a partir de carbonatos, materia orgánica o aplicaciones de agua carbonatada.

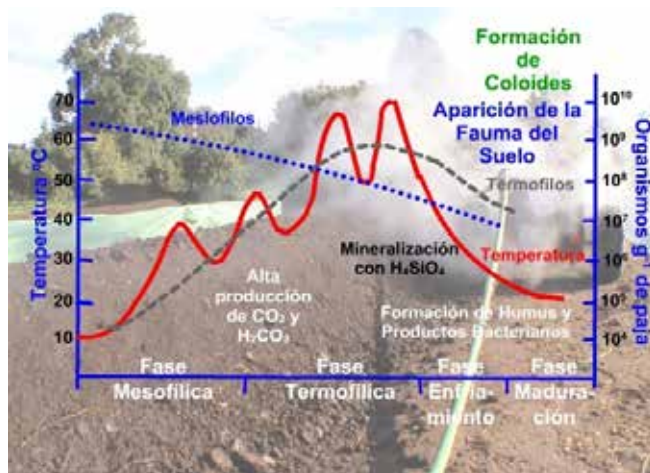
Por otro lado, en suelos ácidos con alto contenido de aluminio es vital la remineralización para mejorar la productividad agrícola. La reacción propuesta es la siguiente:



Por ello, en la remineralización y recuperación de suelos, es recomendable incorporar al suelo:

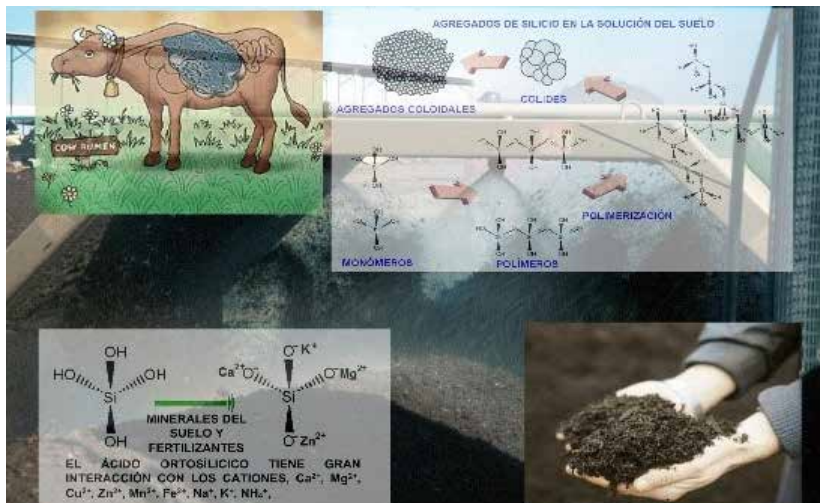
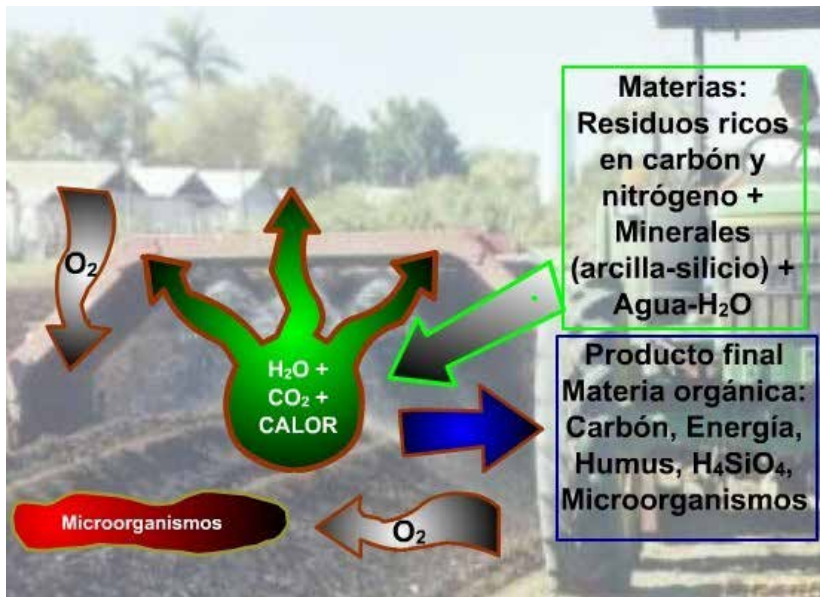
1. **Materia orgánica**, a través de heces fecales de animales que consumen vegetales verdes o secas (rumiantes) y esquilmos de cosecha o de maleza verde. Es importante cuidar que el contenido de aluminio sea menor al 3%.
2. **Consortio de microorganismos**, bacterias, algas, protozoarios y hongos. Se recomienda emplear fuentes con alta diversidad microbiana, como son el líquido ruminal del ganado vacuno y las algas marinas y de ríos.
3. **Minerales primarios**, el empleo de harinas y arcillas ricas en silicio. Es importante cuidar que el contenido de aluminio sea menor a 5% y la relación silicio/aluminio sea mayor a 4.





Se ilustra esto en las siguientes figuras y tablas:





Composición elemental de diferentes minerales que pueden ser encontrados en el suelo, dependiendo de su origen y grado de erosión. Los datos se expresan en % del peso seco del mineral (pm = peso molecular).

MINERAL	PM g/mol	Si	O	Al	Ca	Mg	H	Fe	K	Na	C
Cuarzo	60.08	46.74	53.26								
Albita	263.02	31.50	48.66	10.77	0.76					8.30	
Ortoclasa	278.33	30.27	45.99	9.69					14.05		
Microclina	278.33	30.27	45.99	9.69					14.05		
Talco	379.27	29.62	50.62			19.23	0.53				
Enstatita	200.78	27.98	47.81			24.21					
Tremolita	812.37	27.66	47.27		9.87	14.96	0.25				
Diópsido	216.55	25.94	44.33		18.51	11.22					
Magnesio hornblenda	821.16	23.94	46.76	5.75	9.76	11.84	0.25	1.70			
Augita	236.35	22.48	40.62	4.57	15.26	9.26		4.73		0.97	
Caolinita	258.16	21.76	55.78	20.90			1.56				
Moscovita	398.71	21.13	47.35	20.30			0.46		9.81		
Montmorillonita	549.07	20.46	64.11	9.83	0.73		4.04			0.84	
Biotita	433.53	19.44	43.36	6.22		14.02	0.41	6.44	9.02		
Olivina	153.31	18.32	41.74			25.37		14.57			
Epidotas	519.30	16.22	40.05	3.90	15.44		0.19	24.20			
Alófana	225.11	16.22	57.57	23.97			2.24				
Imogolita	198.08	14.18	56.54	27.24			2.04				
Clorita	1227.19	13.73	50.85	6.60	1.96	9.90	2.30	13.65	0.64	0.37	
Vermiculita	504.19	5.57	50.77	23.01		8.68	2.00	9.97			
Calcita	100.09		47.96		40.04						12.00
Dolomita	184.40		52.06		21.73	13.18					13.03
Gibbsita	78.00		61.53	34.58			3.88				

Composición mineral de suelo, agua, composta y fertilizantes de nueva generación ricos en silicio. el análisis de los minerales se realizó con la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, en el laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Los datos se expresan en promedio de materiales colectados en diferentes regiones agrícolas.

Elemento	Suelo agrícola		Demanda	Agua riego	Composta Ganado + Minerales	Mineral Silimotion®		
	Limitado	Bueno				Normal	Plus	Fósforo
	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Kg/lín 50 mm	Kg/ton	Kg/ton	Kg/ton	Kg/ton
Cobalto (Co)					0.15			
Cobre (Cu)					0.68	0.30		
Cromo (Cr) K					0.70			
Manganeso (Mn)					0.98	1.73	2.10	
Zinc (Zn)					1.43	21.20	26.93	20.57
Molibdeno (Mo)				0.27	1.70	0.50	5.80	
Sodio (Na)				1.31	7.22	9.53		
Azufre (S)				0.18	12.97	1.15		2.20
Nitrógeno (N)				0.34	16.60			
Cloro (Cl)	12.60	2.45	-10.15	0.65	11.62	1.03	1.80	1.85
Titanio (Ti)	20.65	7.70	-12.95		0.88	0.40		
Fósforo (P)	14.35	19.95	5.60		24.57	0.47		46.50
Magnesio (Mg)	13.30	22.05	8.75	2.63	10.02	22.53	16.63	9.47
Calcio (Ca)	30.80	27.65	-3.15	1.39	90.77	116.23	63.40	134.70
Potasio (K)	13.30	49.00	35.70	0.47	29.12	12.27	20.33	13.80
Hierro (Fe)	186.90	71.05	-115.85	0.47	7.30	23.37	36.10	37.33
Aluminio (Al)	365.75	233.80	-131.95	0.51	12.12	19.23	30.73	23.60
Carbón (C)	333.20	299.25	-33.95	2.51	278.80	133.90	114.03	102.40
Silicio (Si)	472.15	723.45	251.30	12.17	55.13	90.63	147.43	101.47
Oxígeno (O)	1901.55	2035.95	134.40	25.58	451.57	546.50	541.23	508.17

SILICIO EN LA PROTECCIÓN DE LAS PLANTAS

El silicio es el segundo elemento en abundancia en la corteza terrestre y minerales primarios, después del oxígeno. En la naturaleza se encuentra en estado oxidado y se representa como dióxido de silicio (SiO_2), aunque su forma soluble principalmente está en la forma de ácido ortosilícico y sus sales derivadas. No obstante que el silicio no se considera dentro de los 16 elementos esenciales para la nutrición, tiene una acción dinámica en el sistema agua-suelo-planta, estimándose que anualmente se remueven del suelo un promedio de 400 kilos por hectárea, ya que se encuentra presente de manera soluble y sólida en los diferentes tejidos de la planta, especialmente, formando parte de las células que componen el sistema tegumentario. En las hojas está dependiendo de las condiciones bióticas y abióticas del medio ambiente, por lo que su concentración es variable durante el desarrollo del cultivo, observándose concentraciones de 200 a 7,000 mg/kg, mientras que en el suelo la concentración de silicio soluble está presente entre 5 y 250 mg/kg.

EL SISTEMA TEGUMENTARIO COMPRENDE DOS
TEJIDOS: EPIDÉRMICO Y SUBEROSO

Tejido epidérmico: Está formado generalmente por una sola capa de grandes células vivas, de tamaño y aspectos diversos y sin espacios in-

tercelulares; revisten el exterior de las plantas y las protegen. La capa más externa es la epidermis, que recubre todos los tejidos de la planta (hoja, tallo, raíz, flores, frutos), excepto los meristemos apicales y el extremo de la raíz (caliptra). Las células tienen forma muy variable, aunque especialmente son tubulares, aplastadas o alargadas; los contornos en algunas son ondulados o festoneados, lo cual les permite una mayor cohesión. Poseen poco citoplasma, abundante agua, numerosas y grandes vacuolas, núcleo pequeño y no tienen cloroplastos. La epidermis regula la transpiración y el intercambio gaseoso, almacena agua y productos del metabolismo y protege contra las acciones mecánicas exteriores, gracias a la abundante secreción de celulosa, calcio y silicio. El silicio forma agregados insolubles (fitolitos) y solubles (polímeros del ácido ortosilícico), entrelazados con la celulosa y componentes de la pared celular, haciéndolas resistentes y flexibles. La epidermis puede estar en una o varias capas de las células. Estas tienen a veces una membrana impregnada de una sustancia impermeable, la cutina, llamada cutícula, que es delgada, brillante y translúcida, con lo que protegen al tejido subyacente contra la acción del agua, del aire y los microorganismos.

Además de las células normales en la epidermis, existen otras células especializadas, llamadas células guarda u oclusivas, cuya característica es poseer cloroplastos y no tienen comunicación con las células vecinas a través de plasmodesmos. Dos células guarda forman un estoma; se trata de aberturas que permiten el intercambio de gases entre el interior de la planta y el exterior, regulando la fotosíntesis y respiración, y que sirven también para expulsar el exceso de agua y minerales (la gutación). Las estomas se encuentran principalmente en la parte inferior de la hoja (envés). Pueden ocurrir en una densidad de entre 6,000 y 45,000 estomas/cm². También en la epidermis se producen los tricomas o pelos, en hojas, tallos, flores, frutos y raíces. En la raíz los tricomas radicales absorben el agua y nutrientes del suelo. Los tricomas pueden ocurrir en densidades de 10 a más de 1,000 tricomas/cm², principalmente en la parte superior de la hoja (haz).

Es importante mencionar que la densidad de estomas y tricomas se debe a la influencia de las condiciones del medio ambiente y a la disponibilidad de nutrientes, particularmente de silicio, calcio, potasio y magnesio.

El sistema tegumentario cubre a los diversos órganos de los vegetales y les presta protección contra la acción de diversos agentes abióticos: aire, radiación solar, cambios bruscos de temperatura y humedad, golpes, etc., y evita también la evaporación rápida del agua que se encuentra en los tejidos internos –evaporación que ocasionaría trastornos muy graves a las plantas, especialmente a las que son propias de climas cálidos o desérticos–. Sin embargo, este revestimiento no es absoluto ya que la planta no podría efectuar cambios constantes con el medio externo, que le son indispensables; así, la pared terminal de las raíces no está cubierta por este sistema, y en los órganos aéreos se encuentran multitud de orificios que permiten los cambios gaseosos y la evaporación del agua.

Tejido suberoso: Cuando los órganos de la planta comienzan a crecer en grosor, la epidermis se rompe y es reemplazada por el tejido suberoso, conocido también con el nombre de corcho. Las células que lo forman son aplanadas y al alcanzar la madurez se recubren de suberina, sustancia que, al ser impermeable, origina la muerte de las propias células. Sin embargo, el intercambio gaseoso aún es posible y se realiza a través de las lenticelas, aberturas cuya cavidad está ocupada por células no suberificadas, entre las cuales circulan los gases. También forman parte de la protección de los tejidos contra la pérdida de agua y ataque biótico.

Las células de la epidermis que participan activamente en la protección de los tejidos de la planta contra agentes abióticos y bióticos son los tricomas, cuya densidad y cuyo tamaño son influidos por la disponibilidad de silicio en el medio nutritivo. Por ello, se presenta la siguiente discusión.

Tricomas: Los tricomas o pelos vegetales se originan por crecimiento local de algunas células epidérmicas; su parte inferior, el pie, está enclavado en la epidermis, mientras que el cuerpo se eleva por encima de esta. En cuanto a su forma y función, existe una gran diversidad. Pueden ser unicelulares o pluricelulares, lineales, ramificados, estrellados, discoidales, absorbentes, vivos o muertos, papilosos o en forma de pequeña cabeza. Las paredes de ciertos pelos se vuelven pluriestratificadas debido a la oposición de la pared secundaria, como el tricoma unicelular del algodón. Otros modifican sus propiedades mecánicas por incrustaciones en la pared celular, y otros experimentan una transformación correspondiente a su función, que a veces es muy complicada, como es el caso de los tricomas glandulares, los absorbentes, los escamosos y los urticantes. Los tricomas glandulares secretores presentan una cabeza uni o pluricelular. El producto secretado frecuentemente se aloja entre la pared externa de la célula y la cutícula, que se levanta y al fin se rompe liberando sus componentes, que pueden ser volátiles.

Se han estudiado los tricomas en el 45% de las plantas vasculares, muchas de las cuales son cultivadas. Estas poseen principalmente tricomas glandulares que secretan diferentes metabolitos secundarios, dependiendo de la especie. Los metabolitos (fitoquímicos) más comunes son los terpenos (mono-terpenos, sesquiterpenos, diterpenos y triterpenos), flavonoides, fenoles y fenilpropanoides; algunos de ellos forman glicósidos como medida de regulación. La cantidad del exudado que producen puede llegar hasta el 30% del peso seco de hojas maduras, dependiendo de la especie y las condiciones de crecimiento. De manera importante, los tricomas glandulares, a través de la liberación de compuestos fitoquímicos, permiten la resistencia y tolerancia de las plantas al ataque de agentes bióticos. Esto permite el control biológico de plagas y enfermedades, ya que las sustancias liberadas actúan como repelentes, insecticidas, fungicidas, aleloquímicos, y también participan en la percepción de estímulos que mejoran la protección y adaptación de los vegetales.

Las funciones que desempeñan los tricomas glandulares son variadas. Sus características morfológicas y mecánicas (densidad, tamaño, textura superficial, forma, orientación) pueden influir la respuesta fisiológica y ecológica de las plantas, por ejemplo:

- Protegen, disuaden y/o inmovilizan el ataque de insectos, hongos y herbívoros que dañan el tejido foliar. En general, mejoran la sanidad del cultivo. El proceso de repeler el ataque, que causa una reducción en la oviposición y alimentación de los agentes bióticos, se define como antixenosis y antibiosis.
- Mejoran el aprovechamiento de la luz solar, limitando el daño por alta insolación y el daño por luz ultravioleta; también incrementan el albedo (reflexión de la luz) y con ello regulan la temperatura, pérdida de agua, la fotomorfogénesis y la asimilación de luz y bióxido de carbono (fotosíntesis), mejorando la productividad.
- Regulan la homeostasis de calcio (Ca^{+2}) y silicio (Si^{+4}) y la nutrición mineral y toxicidad de hongos y bacterias, que ocurren en el ambiente de la hoja.
- Permiten la secreción y absorción de agua, nutrientes y la eliminación de metales contaminantes como aluminio (Al).
- Apoyan el amarre y desarrollo de frutos a través de: mejorar la colección y dispersión de polen y la atracción y guía de polinizantes (insectos, p.e. abejas).
- En las semillas, mejoran su dispersión, establecimiento y germinación; esto último al mejorar la retención de humedad.

LA EPIDERMIS QUE CARECE DE TRICOMAS SE DENOMINA GLABRA

Los tricomas glandulares están constituidos por silicio entre 1 y 30%, y, dependiendo de la densidad, participan en el contenido total de silicio en la hoja con un 50 a 80%. Los tricomas pueden estar en cualquier órgano de la planta y persistir durante toda la vida de esos órganos o bien ser efímeros. Las células pueden permanecer vivas o perder el protoplasto; hay varios tipos de tricomas en la misma planta y órgano y varían entre distintas especies. Son además útiles en taxonomía, para caracterizar especies, géneros o a veces grupos más grandes.

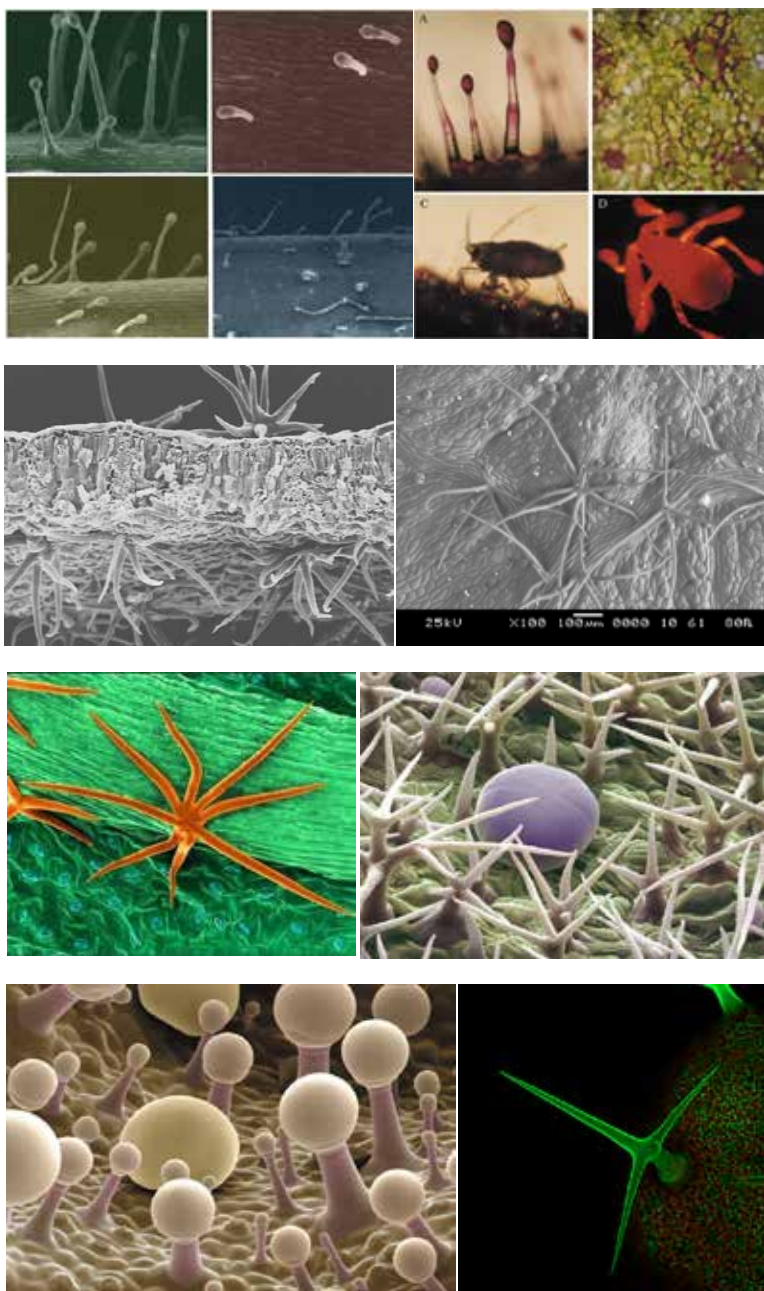
El manejo de la densidad y actividad de los tricomas, de follaje y raíz en los cultivos agrícolas es una importante herramienta para el control y combate de diversas plagas, como áfidos o pulgones, ácaros, mosquita blanca, gusanos de hoja y fruto, chinches, chicharritas y paratrioza, que se presentan en cultivos de papa, frijol, jitomate, chile, arroz, maíz, alfalfa, avena, caña de azúcar y calabacitas, entre otros. Por otro lado, se mejora la asimilación de nutrientes a través de los tricomas de la raíz.

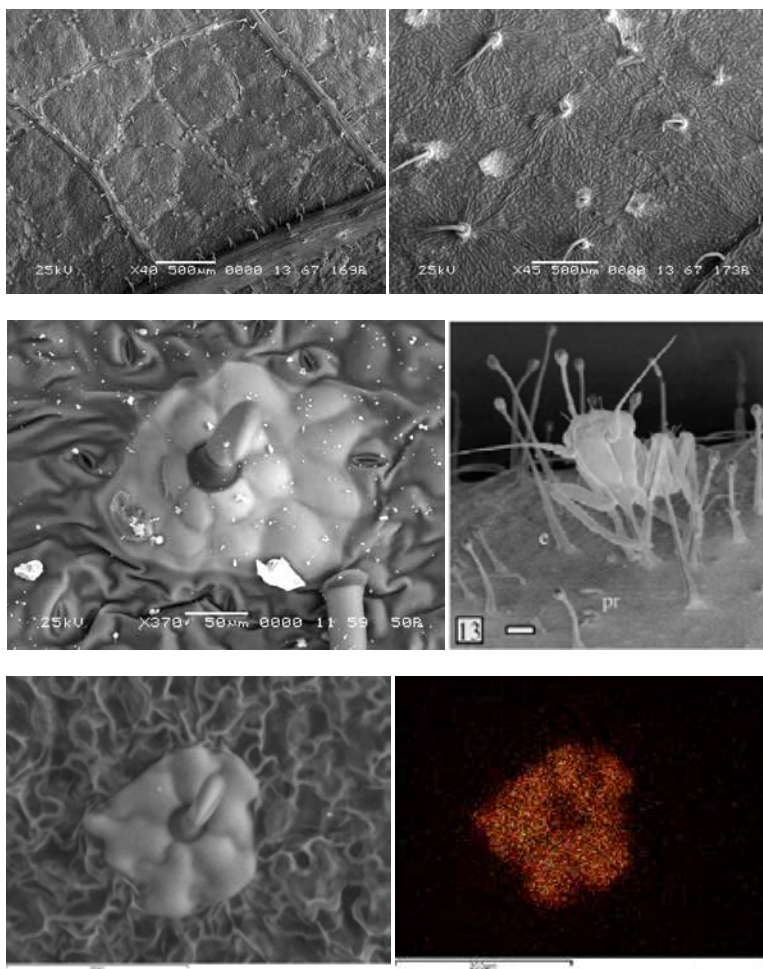
Por lo anterior, la nutrición con silicio es vital y puede ser limitante para el manejo sustentable con calidad y sanidad de cultivos agrícolas y sus cosechas. Se recomienda que los suelos contengan 25% de silicio elemental y que al menos un 15% de este elemento provenga de minerales primarios. En promedio, los cultivos extraen anualmente entre cien y 800 kilos de silicio por hectárea, dependiendo de la productividad y demanda del cultivo, por lo que se recomienda la remineralización con minerales primarios ricos en silicio como el Silimotion®. Es importante comentar que el silicio que se encuentra en los minerales requiere de un aporte frecuente de agua, y la solubilidad se mejora con la adición de materia orgánica y bióxido de carbono. El silicio soluble estará en la forma de ácido ortosilícico y las sales derivadas de este, como son el silicato de calcio, silicato de zinc, etc., las cuales son asimiladas por el sistema radicular de la planta.

Figuras: En las figuras siguientes se muestra de manera secuencial la ocurrencia de tricomas en tejido foliar: Primeramente, se muestran los diferentes tipos de tricomas, continuando con observaciones típicas de campo, donde es posible observar diferentes densidades y tamaños (largo y grosor), sin olvidar el tricoma unicelular más largo, las fibras de algodón. Enseguida se muestran los tricomas observados bajo el microscopio óptico, destacando la interacción entre tricomas e insectos. Por último, se muestran imágenes de tricomas de algodón, frijol y alfalfa, observados en un microscopio electrónico de barrido (SEM Jeol 6460LV-EDS), que se encuentra en las instalaciones de la división de investigación del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. En las

dos últimas imágenes se muestra un tricoma de frijol y un mapa de la distribución de silicio en el tricoma y tejido adyacente, siendo evidente la acumulación de silicio en la estructura del tricoma.







REMINERALIZACIÓN DE SUELOS CON MATERIALES RICOS EN SILICIO MPA_{Si}

El método de remineralización de suelos consiste en adicionar minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}). Los MPA_{Si} se caracterizan por ser materiales sólidos que tienen diferente composición y concentración de: oxígeno (O²⁻), silicio (Si⁴⁺), hierro (Fe²⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), zinc (Zn²⁺), potasio (K⁺), sodio (Na⁺), fósforo (P⁵⁺) y carbón (C⁴⁺). De estos, el oxígeno ocupa más del 50% de la concentración, por lo que los cationes están presentes en el estado oxidado.

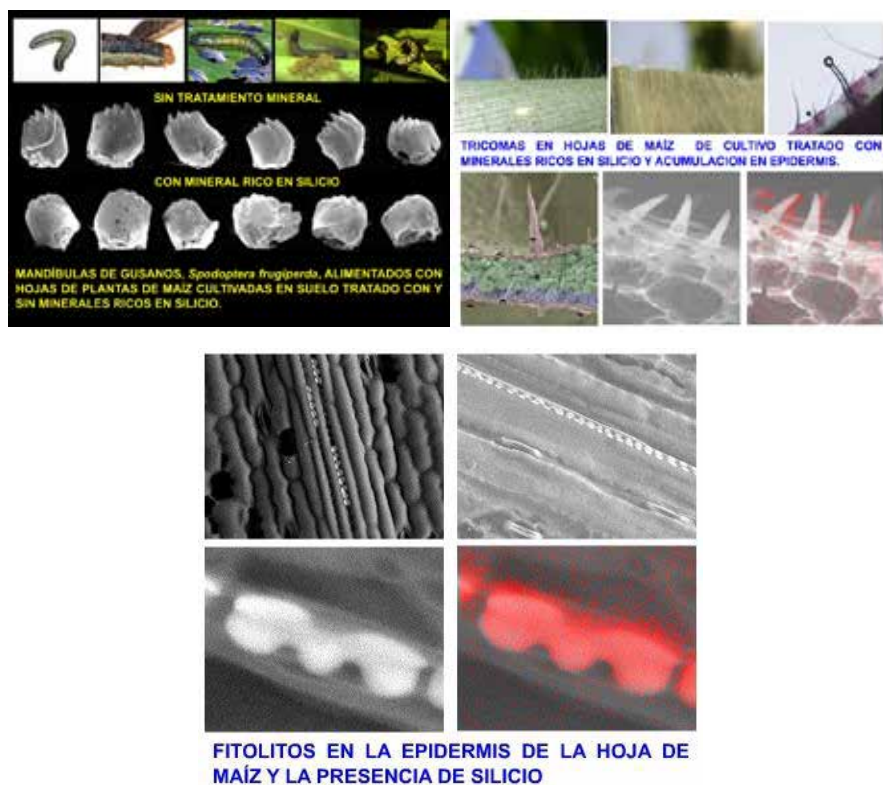
Es importante que los MPA_{Si} estén finamente molidos para lograr una mayor superficie de contacto con los componentes de medio ambiente. En presencia de agua, los MPA_{Si} forman una fase soluble y otra sólida intemperizada; la velocidad de este proceso puede variar de días a miles de años, por ello la necesidad de remineralizar con MPA_{Si} que permitan mantener un flujo constante de elementos minerales que la planta emplea en su nutrición. La composición de la fase soluble es influida por el tiempo de exposición de los MPA_{Si} al agua [H₂O] de lluvia y riego (recordemos que el agua es el disolvente universal, y que el agua y el silicio forman una solución con gran capacidad de disolver cationes); al bióxido de carbono [CO₂] del ambiente o bien producto de la descomposición de la materia orgánica y actividad biológica del suelo, y al calentamiento del suelo debido a la radiación solar. En la fase

soluble, se encuentra el silicio en la forma de ácido ortosilícico [H_4SiO_4] como monómero, y también en diferentes grados de polimerización y coloides, mismos que forman sales con los cationes presentes, dando lugar a silicatos que promueven la creación de gradientes de concentración de nutrientes minerales desde el suelo hasta los tejidos de la planta. Para que esto ocurra, es ideal que la concentración de ácido ortosilícico en la solución del suelo sea permanentemente mayor a 70 ppm (aprox. 35 kg/ha en la zona radicular). Con esta concentración se promueve el flujo de silicio a los diferentes tejidos de la planta. Uno de estos es la epidermis foliar y radicular, donde se desarrollan los tricomas y fitolitos. Los tricomas en su estructura tienen altas concentraciones de silicio y estos forman parte de la capacidad de adaptación y resistencia al estrés biótico y abiótico, ya que crean una barrera física y están ligados a la producción de compuestos que repelen y controlan el ataque de insectos y enfermedades. Así también, diferentes formas del ácido ortosilícico participan en la mejora de procesos biológicos involucrados en la productividad, como son la asimilación y el flujo de minerales; la producción, acumulación y movilización de reservas de carbohidratos y proteínas, y la producción de fitoquímicos. Esta mejora permite obtener mayores cosechas en volumen y calidad sanitaria, nutracéutica y funcional.

La tecnología de remineralización de suelos se logra aplicando de 0.5 a 1.5 ton/ha de MPA_{Si} , siendo posible lograr incrementos en la producción de las siguientes cosechas: en frijol bajo condiciones de temporal, es posible pasar de 300 a 1,000 kg/ha y bajo condiciones de riego la producción supera los 4,000 kg/ha. El contenido de nitrógeno proteico en la semilla se mejora substancialmente dado que ocurre una mayor nodulación y por lo tanto una mejor colonización con bacterias fijadoras de nitrógeno. En el cultivo de frijol los MPA_{Si} se aplican al momento de la siembra a un lado de la semilla, esto promueve la formación de tricomas en número y tamaño desde las primeras etapas de desarrollo. Los tricomas contienen más de 30% de silicio, por ello un indicador práctico de la demanda de silicio es observar la presencia de tricomas;

si se observan pocas de estas estructuras, se debe aplicar una mayor cantidad de MPA_{Si} . Por lo general, no se recomienda aplicar más de 2 ton/ha por ciclo agrícola. Esta práctica debe mantenerse hasta lograr contenidos mayores a 20% de silicio en el suelo. Para acelerar el proceso de remineralización, es altamente recomendable aplicar los minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) con materia orgánica (MO); en una relación de 1:1 o 2:1 (MPA_{Si})/ (MO), ya muestran gran actividad sinérgica.

En el cultivo de caña, la producción es de 60 ton/ha en suelos con 16% de silicio, mientras que se pueden cosechar más de 180 ton/ha en suelos con 22% de silicio. El cultivo de la caña, y en general de las gramíneas, es altamente demandante de silicio. En promedio la caña extrae anualmente 370-500 kg/ha de silicio. Las hojas de la caña desde que nacen contienen gran cantidad de tricomas y fitolitos, por lo que el contenido de silicio en estas varía entre 1.5 y 5%. Otras gramíneas que demandan de silicio y que muestran respuesta a la aplicación de MPA_{Si} son el arroz, cebada, avena, trigo, sorgo y maíz. En estos cultivos la remineralización se realiza al momento de la siembra con 0.5 ton/ha y en la primera escarda se aplica otra cantidad igual o bien 1.0 ton/ha. Nuevamente, los indicadores son la presencia de tricomas y fitolitos, los cuales incrementan el color verde y brillo de la hoja (albedo). A manera de ejemplo, en las siguientes figuras se muestra cómo los tricomas y fitolitos apoyan el control y combate de insectos. Un insecto que causa grandes daños en el cultivo de maíz es el gusano cogollero *Spodoptera frugiperda*. El gusano, al comer las hojas de maíz cultivado en suelo remineralizado con MPA_{Si} , deteriora sus mandíbulas, dificultando su alimentación ya que prácticamente come “vidrio” y consecuentemente se controla el ataque del insecto. Ello permite mejorar las condiciones de desarrollo del cultivo con un incremento de rendimiento. En buenas condiciones de silicio en el suelo, con una concentración mayor a 20%, es posible lograr bajo riego y adecuada aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio, de 12 a 16 ton/ha de grano de maíz. Un similar efecto se observa en el comportamiento y ocurrencia de otros insectos.



Los cultivos de frutales como aguacate, fresa, limón y mango se adaptan también al estrés biótico y abiótico con la aplicación de minerales ricos en silicio, MPA_{Si} . La ocurrencia y severidad de las enfermedades causadas por hongos y bacterias son limitadas y la calidad de cosecha se mejora en cantidad y calidad (tamaño, sanidad). En el cultivo de la fresa es posible obtener cosechas superiores a las 60 ton/ha, sobre todo cuando se combina con la tecnología de riego presurizado y el acolchado de suelo. En el cultivo de aguacate se observa que los retoños y frutos nacen cubiertos de tricomas, y una mayor vida media de los tricomas está ligada al flujo de nutrientes, sanidad y productividad del cultivo. Adicionalmente se mejora la capacidad de los tallos para

almacenar reservas de carbohidratos en la forma de almidón, mismos que se emplean en la producción de frutos. Es importante destacar que los minerales ricos en silicio han demostrado óptimo desempeño en el cultivo orgánico.

En las solanáceas, chile y papa, los resultados se observan en la sanidad del cultivo, calidad y uniformidad de cosecha además de un incremento en el volumen. Estos cultivos y el jitomate también muestran una alta relación de la aplicación de los minerales ricos en silicio con la presencia de tricomas en número y tamaño. Es relevante comentar que los tricomas están relacionados con la producción de terpenos que repelen y controlan el ataque de insectos dañinos, aunque también funcionan para atrapar el polen y atraer insectos benéficos.

El cultivo del algodón, en donde la fibra es un tricoma, la aplicación de silicio eleva la calidad de la fibra y su producción, además de mejorar la tolerancia al estrés biótico y abiótico del cultivo.

En todos los casos, la mejor respuesta a los MPA_{Si} se logra cuando se aplican desde el inicio del desarrollo de la planta y cultivo, mientras que durante el desarrollo del cultivo es importante la presencia de silicio antes de la floración.

Adicionalmente, la remineralización permite:

- Revertir el proceso de erosión del suelo y deterioro de la actividad agrícola mediante el manejo de la concentración de silicio en el suelo, llevándolo a concentraciones mayores de 20%.
- Proporcionar valor agregado a los suelos agrícolas, mediante el manejo del contenido de silicio y materia orgánica.
- Proporcionar valor agregado a las cosechas agrícolas, mediante el conocimiento de la composición química y mineral de los alimentos producidos en cosechas tratadas con minerales ricos en silicio (MPA_{Si}).

EL SILICIO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS Y LA REMINERALIZACIÓN

Se establece, según las experiencias propias del autor en el manejo de la producción agrícola, que en la fisiología de los cultivos y la nutrición vegetal:

- a. El silicio se encuentra en la naturaleza en estado oxidado (SiO_2) y ocupa del 70 al 90% de los componentes sólidos del suelo, observando en la solución del suelo de 50 a 150 ppm de ácido ortosilícico [H_4SiO_4], la forma soluble del silicio. Como el silicio no es indispensable para la ocurrencia del metabolismo primario, no se le considera un elemento esencial, sin embargo su presencia lo potencializa posibilitando la adaptación ante el estrés biótico y abiótico, e incrementa la vida media de hoja, tallo, raíz y cosecha.
- b. El agua es el disolvente universal y esta propiedad es mejorada substancialmente cuando está el silicio en la forma de ácido ortosilícico. Por ello los nutrientes son mejor asimilados cuando el silicio está presente en la solución.
- c. El silicio contenido en el suelo varía según la explotación agrícola, ocurriendo concentraciones en la capa arable de 25 cm, desde 350 ton/ha hasta 780 ton/ha. Se detecta que la concentración limita la productividad y sanidad de cultivos y cosechas. Por ello se plantea que el silicio forma parte indispensable en el desarrollo agrícola sustentable.
- d. Las moléculas de silicio fisiológicamente activas son solubles, estables y asimilables, y estas incluyen a monómeros, dímeros, polímeros y coloides de ortosilícico [H_4SiO_4], potencializando su función en los vegetales cultivados contra el estrés biótico y abiótico, al formar oligómeros con polímeros de carbohidratos, proteínas y sus iones con los cationes de calcio, magnesio, potasio, zinc y hierro.
- e. La epidermis, tejido que forma una barrera protectora entre el medio ambiente y las células que componen los diferentes tejidos de la planta, contiene de 10 al 50% de silicio y forma estructuras sólidas y flexibles con funciones biológicas específicas. Algunas de estas formas son los fitolitos y tricomas. Las diferentes formas de tricomas permiten desde la asimilación de nutrientes hasta la liberación de compuestos que repelen y combaten bacterias, hongos, insectos y ácaros que perjudican el desarrollo de los cultivos. Así también, cuando el cultivo se desarrolla adecuadamente, el silicio estimula la simbiosis con microorganismos e insectos. Además, en las células de la epidermis, el silicio puede estar en forma polimérica y coloidal, lo cual

permite mantener disponibles agua y minerales, manteniendo turgente al tejido foliar. Por otro lado, los fitolitos permiten aprovechar mejor la luz, ya que ellos la dispersan y eliminan el efecto de la luz ultravioleta. Todo esto permite una protección física y química, que resulta en resistencia y adaptación al estrés biótico y abiótico.

- f. Adicionalmente, las diferentes formas de silicio soluble en los tejidos vegetales permiten una mejor movilidad de minerales, carbohidratos, metabolitos secundarios y proteínas, ello a través de inducir la formación de tejido vascular del tipo traqueidas y por interacción química iónica, mejorando substancialmente los procesos metabólicos involucrados en la productividad, por lo que los minerales ricos en silicio mejoran la producción de cosechas en cantidad y calidad.
- g. Para la mejor producción, es importante que la disponibilidad en cantidad, oportunidad y calidad de silicio se proporcione desde el inicio del desarrollo de la planta. Por ello los minerales ricos en silicio deben aplicarse desde la germinación y durante todo el desarrollo del cultivo, ya que las estructuras silíceas se renuevan y se forman constantemente, sobre todo en los sitios de activo crecimiento foliar y radicular.
- h. El sistema radicular tiene capacidad de detectar la presencia de silicio, desarrollando diferentes estrategias metabólicas y fisiológicas para asimilarlo. Se propone que estas acciones se observan en el desarrollo de tricomas absorbentes radiculares (raíz secundaria), tejido de conducción del tipo xilema, las traqueidas, y se activa la capacidad de almacenamiento de reservas de carbohidratos en la forma de almidón o fructanos en células especializadas, principalmente contenidas en la médula del tallo. Con la presencia de silicio en la nutrición, las plantas desarrollan un sistema de protección, proporcionada por mejor contenido de silicio en la epidermis en la forma polimérica, ácido ortosilícico y silicio sólido. Esto se observa por el desarrollo de tricomas estructurales (contienen de 13 al 50% de silicio) y globulares, que tienen funciones variadas, incluso contrapuestas: favorecer o ralentizar la transpiración, repeler o atraer a insectos, ácaros, hongos, bacterias, animales. Aquí nosotros destacamos la propiedad de proteger a la planta contra el estrés biótico y abiótico. Por lo antes expuesto, se propone que el flujo de silicio es fundamental para el desarrollo sustentable de cosechas.
- i. La calidad nutritiva y funcional de las cosechas está relacionada con la disponibilidad de silicio durante el crecimiento y las diferentes fases fenológi-

cas del cultivo. Sobre todo, durante el almacenamiento y movilización de reservas.

MINERALES RICOS EN SILICIO DESARROLLADOS

En colaboración entre el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan y con la empresa particular, se han desarrollado diferentes presentaciones de minerales amorfos ricos en silicio. Estos materiales son rocas minerales molidas y no son productos desarrollados químicamente, por lo que se adaptan bien a la agricultura orgánica. Los minerales desarrollados son:

Fuentes minerales de silicio desarrolladas

Composición elemental de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA _{si}). la forma comercial se encuentra como una línea de fertilizantes de nueva generación, "Silimotion". esta fue desarrollada por el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan y la empresa. El análisis de los minerales se realizó con la técnica de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X en el Laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Los valores están en % de peso seco.					
Elemento	Base	Plus	Ultra	Mega	Fosfo
Oxígeno (O)	37.63	53.89	54.12	55.18	50.82
Calcio (Ca)	30.80	11.81	6.34	0.35	13.47
Carbón (C)	6.93	12.89	11.40	2.58	10.24
Silicio (Si)	5.82	9.05	14.74	30.21	10.15
Fósforo (P)					4.65
Hierro (Fe)	8.26	2.38	3.61	1.39	3.73
Aluminio (Al)	1.24	2.04	3.07	5.48	2.36
Zinc (Zn)	2.73	2.28	2.69		2.06
Potasio (K)	1.37	1.17	2.30	5.05	1.37
Magnesio (Mg)	4.86	3.14	1.66		0.95

FERTILIZACIÓN PARA EL CRECIMIENTO GENERATIVO EN CULTIVOS BAJO INVERNADERO

El desarrollo de la vida en la Tierra se realizó en una corteza terrestre rica en minerales con silicio (25 al 30% del peso seco), los cuales, en presencia de agua, capturaron el bióxido de carbono del aire ($\text{CO}_{2(\text{gas})}$), ocurriendo la intemperización y creándose las formas solubles de ortosilicatos, carbonatos, bicarbonatos y cationes (calcio, magnesio, zinc, hierro, etc.). Los carbonatos actualmente forman una gran parte del carbón almacenado en el suelo, el cual es del orden de 1,580 GtC (GtC = giga toneladas de carbón = 10^9 ton métricas). Los carbonatos en presencia de agua y $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ también se disuelven, liberando cationes y bicarbonatos (figura 1). Estos últimos, si ocurre una demanda, pueden retornar al aire, enriquecerlo (eCO_2) y ser parte del $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ capturado por los organismos fotosintéticos y emplearse para el crecimiento generativo. Recordemos que el peso seco de los tejidos vegetales está compuesto por 90-95% de CO_2 . Dadas las propiedades químicas del carbón, este es fundamental en los sistemas biológicos para la captura, almacenamiento y movilización de energía, mediante el metabolismo de azúcares, almidón, lípidos y grasas, creando también estructuras químicas orgánicas altamente específicas para la regulación de la acti-

vidad biológica; hormonas, vitaminas, fotoquímicos, etc. Todos ellos presentes en alta concentración en las cosechas agrícolas.

Por otro lado, el silicio en la forma soluble, ácido ortosilícico (H_4SiO_4), incrementa el potencial disolvente del agua, activando el intercambio y la movilización de cationes. Estas formas solubles del silicio son asimiladas por las raíces, apoyando en estas el desarrollo de tejido de transporte de minerales, xilema, en especial de traqueidas; así también, induce el crecimiento de tejido para el almacenamiento de reservas. Ello se puede notar en la planta con el incremento de turgencia y mayor diámetro y número de tallos y retoños florales. Al ocurrir este crecimiento que demanda de mayor asimilación de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$, se estimula el crecimiento de las hojas, observándose mayor área foliar. Esta mayor área foliar requiere de protección contra agentes bióticos y abióticos. Aquí el silicio tiene un papel importante, al cubrir las células de la epidermis con elementos ricos en silicio, como son los fitolitos (cristales con el 80% de SiO_2) y tricomas. Estos últimos son células, recubiertas con sales de silicio tanto solubles como insolubles, las cuales producen una diversidad de compuestos volátiles empleados para repeler y combatir el ataque de agentes bióticos, como insectos, bacterias y hongos. Además, ambos fitolitos y tricomas, dependiendo de su densidad y tamaño, protegen al resto de la epidermis contra los agentes abióticos: déficit de presión de vapor (falta de agua en el ambiente), temperatura, viento, insolación, etc. Así también, las sales solubles de silicio en la epidermis crean un gradiente de concentración del $\text{CO}_{2(\text{gas})}/\text{CO}_{2(\text{acuoso})}$ que apoya el incremento de ácido carbónico (H_2CO_3) en la cavidad estomática. Es frecuente encontrar las células de los estomas recubiertas de sales de silicio, cuando los niveles en el suelo de silicio soluble son adecuados (70-150 ppm). Aquí el silicio apoya la captura de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$, lo cual coincide con el hecho de que las plantas con mayor capacidad de asimilación de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$, como la caña de azúcar y maíz, contienen alta densidad de tricomas, fitolitos y altos niveles de silicio en las hojas. Por ello, la intensidad y tamaño de tricomas se puede emplear como un in-

dicador del buen desarrollo de un cultivo y predice una mejor cosecha en calidad y sanidad.

Ante estos hechos, la fertilización generativa se debe concentrar en suplementar silicio y CO_2 a los cultivos agrícolas, sobre todo aquellos donde la productividad requerida es alta, tal como lo demanda la agricultura de riego presurizado y la protegida en invernaderos.

Una nueva cultura en la nutrición vegetal se plantea para el crecimiento generativo de cosecha, dado esto por el crecimiento de tallos, alto índice de área foliar, mayor número de retoños florales y amarre y desarrollo de frutos. Para ello dos elementos sinérgicos deben aplicarse, el silicio y CO_2 . El silicio se puede aplicar a partir de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}), los cuales inducirán la captura del $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ y formas solubles de silicio (ácido ortosilícico H_4SiO_4), ácido carbónico (H_2CO_3), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) y cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+), zinc (Zn^{2+}), hierro (Fe^{2+}). El MPA_{Si} debe aplicarse desde el establecimiento de la semilla en la producción de plántula, formar parte del sustrato donde se desarrollará la planta y mantener una concentración en la solución del nutritiva de 70 a 150 ppm. Una fuente de MPA_{Si} son los fertilizantes de nueva generación, Silimotion®. En el sustrato se deben aplicar los MPA_{Si} frecuentemente en el área radicular de 20 a 50 gramos por maceta, dependiendo del desarrollo y productividad del cultivo; se recomiendan aplicaciones a intervalos de 15 días. Aquí es importante considerar que el agua de riego puede contener buenos niveles de silicio, por lo que se requiere el análisis de este elemento en el agua y sustratos.

Por otro lado, el $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ se puede aplicar en la forma acuosa y soluble a través del sistema de riego presurizado de riego por goteo. Actualmente, el CO_2 generado en los procesos de combustión que realizan las industrias que requieren de gran energía para la transformación de sus productos se captura, licua, almacena y transporta. Esto contribuye con la eliminación del CO_2 del ambiente, el cual provoca el sobrecalentamiento y cambio climático del planeta. El $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ capturado se

transporta en su forma líquida ($\text{CO}_{2(l)}$) hasta las instalaciones de riego presurizado; luego de gasificarse, se inyecta en la línea principal de riego después de filtros e inyección de fertilizantes. Esto incrementa la solubilidad de los fertilizantes. La práctica resulta adecuada sobre todo en cultivos donde los aportes de agua son frecuentes, tal como ocurre en los invernaderos hidropónicos, ya que es posible aplicar el $\text{CO}_{2(gas)}$ en los primeros riegos del día, después de que el rocío se ha eliminado y hasta el mediodía, para mantener una concentración de $\text{CO}_{2(gas)}$ en el ambiente de 500 a 700 ppmv (0.9 a 1.25 g m^{-3}). Como el CO_2 se aplica directamente a la planta en la zona radicular, mezclado con el agua a través del sistema de riego, este se libera lentamente dependiendo de la demanda de las hojas, y además crea un flujo desde el suelo hasta las partes altas de la planta, creando un aire enriquecido con bióxido de carbono ($\text{eCO}_{2(gas)}$). Esta forma de aplicación es altamente eficiente en la fertilización carbónica, eliminando pérdidas significativas del $\text{eCO}_{2(gas)}$. En promedio, una hectárea de invernadero consumirá entre 150 y 200 kilos de $\text{eCO}_{2(gas)}$.

La aplicación de la fertilización generativa ha permitido obtener cosechas tan altas como de $1,000 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en cultivos de tomate hidropónico, aunque es conocida una alta variación en los volúmenes de cosecha, que van de 100 a 600 $\text{ton ciclo}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ de invernadero. Esta variación es atribuida a las deficiencias en aportes de silicio y $\text{CO}_{2(gas)}$. El manejo de este tipo de fertilización generativa, además de mejorar la productividad y calidad nutritiva e inocua de la cosecha y cultivo, permitirá eliminar el $\text{CO}_{2(gas)}$ del ambiente que provoca el sobrecalentamiento y cambio climático del planeta, así como mejorar la rentabilidad de los sistemas agrícolas.

A manera ilustrativa de los anteriores planteamientos, se muestran las siguientes figuras y tabla:

Figura 1. Una gota de agua, rica en CO_2 , incrementa la solubilidad de los MPA_{Si} y nutrientes empleados en la fertilización del cultivo.



Figura 2. Flujo del silicio en los cultivos agrícolas, desde los MPA_{Si} al ortosilícico y su incorporación a los tejidos para formar estructuras que permiten el crecimiento generativo y protección de cosecha y cultivo.



Figura 3. Principales sales de silicio que se encuentran en el tejido foliar y que contribuyen con la captura de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ y removilización de cationes.



Figura 4. Tricomas que cubren la epidermis del envés de las hojas y que protegen a los estomas de factores bióticos y abióticos. Los tricomas están cubiertos por una gruesa capa de sales de silicio soluble e insoluble. Los tricomas producen terpenos que combaten y controlan en ataque de plagas de insectos y enfermedades.

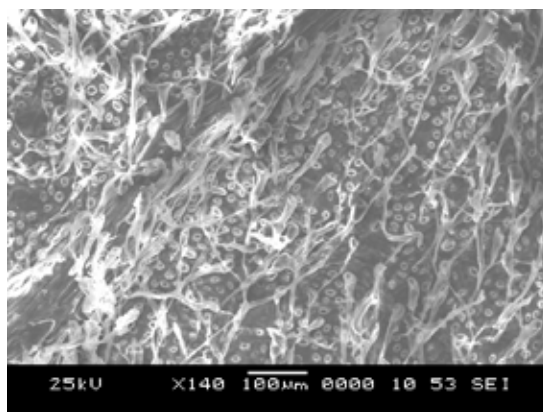


Figura 5. La visible presencia de tricomas en tamaño y densidad en cultivos de solanáceas y cucurbitáceas. Mayor cantidad de tricomas plantas y cultivos sanos y productivos.

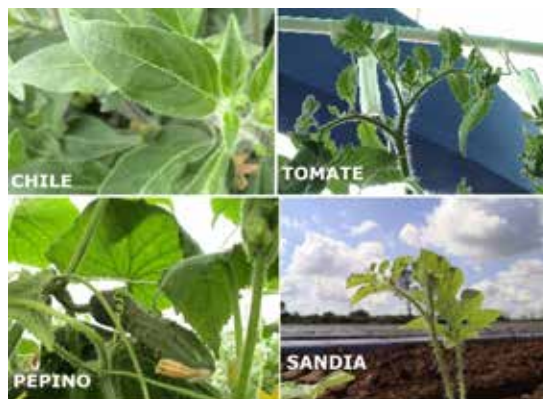


Figura 6. La variación de la concentración de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ en el ambiente, durante el desarrollo de un cultivo, motivo por el cual es importante aplicar atmósferas enriquecidas con bióxido de carbono ($\text{eCO}_{2(\text{gas})}$).
Nótese que los cultivos pueden triplicar la asimilación de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ al enriquecer la atmósfera con 1.5 g m^{-3} (800 ppmv).

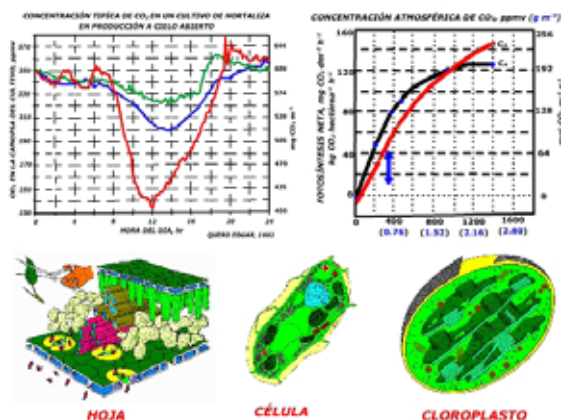


Figura 7. Almidón presente en las células que componen el tejido de reserva; aquí ocurre una gran acumulación de energía y azúcares que serán empleados en el crecimiento generativo.

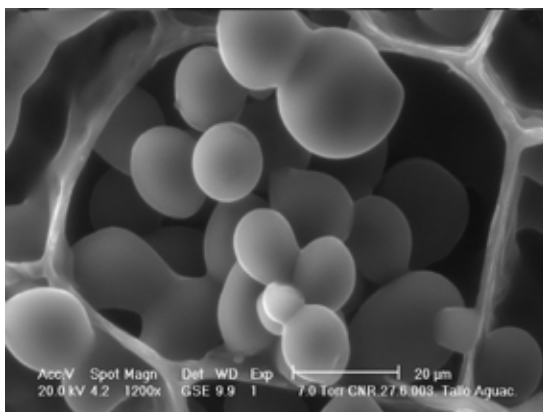


Figura 8. Tejido de reserva con alta acumulación de almidón en las células y la presencia de tejido de transporte, xilema del tipo traqueidas (estructuras en forma de resorte). Crecimiento del tejido estimulado por el silicio, que se correlaciona con mayor diámetro de tallo.

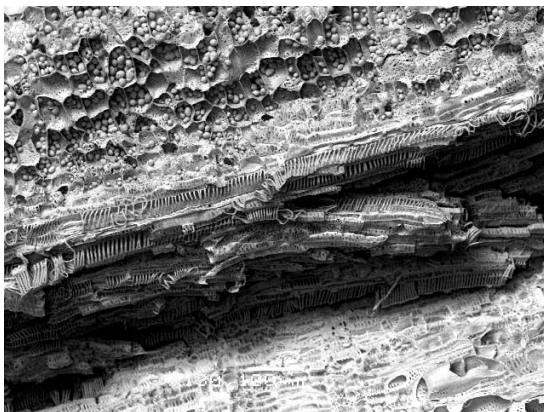


Figura 9. Células de la médula del tallo (tejido de almacenamiento de reservas) con alto contenido de reservas.

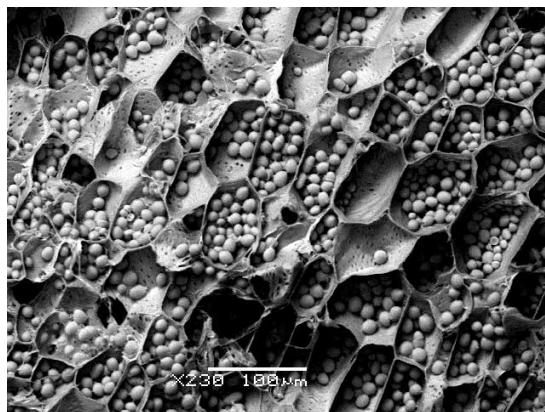


Figura 10. Composición de los fertilizantes de nueva generación Silimotioin, ricos en MPA_{Si} , con gran capacidad de captura de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ y liberación de ácido ortosilícico.

Composición típica de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPASi), que forman parte de la línea de fertilizantes de nueva generación.					
ELEMENTO	NORMAL	Silimotion®	BIOMA-MARINO	O4MAS®	ROCA TÍPICA
SiO_2	14.00	25.50	36.90	31.10	49.20
CaO	32.90	23.80	19.00	26.90	9.47
Fe_2O_3	3.40	4.44	6.58	5.09	3.79
Al_2O_3	3.03	4.29	5.74	5.15	15.74
C	9.47	6.93	5.62	4.42	Trazas
MgO	12.50	9.60	6.02	2.83	6.73
K_2O	1.45	2.47	3.23	2.52	1.10
Na_2O	1.30	2.21	1.92	1.08	2.91
ZnO	1.32	2.09	1.83	1.10	Trazas
P_2O_5	0.01	0.03	0.44	7.73	Trazas
MnO	0.18	0.23	0.22	0.14	0.20
TiO_2	0.07	0.09	0.09	0.08	1.84
CLORUROS	0.07	0.08	0.07	0.04	Trazas
S	0.06	0.13	0.07	0.08	Trazas

Figura 11. Sistema industrial para la captura de $\text{CO}_{2(\text{gas})}$, licuado y almacenamiento y la tecnología agrícola para la aplicación de $\text{eCO}_{2(\text{gas})}$ en cultivos agrícolas que cuentan con riego presurizado.



Figura 12. Sistema de aplicación de $\text{eCO}_{2(\text{gas})}$ y ácido ortosilícico en invernaderos hidropónicos con alta productividad de tomate: $1,000 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.



Figura 13. La nutrición para el crecimiento generativo, en cultivos hidropónicos.

**LA FERTILIZACIÓN PARA EL CRECIMIENTO
GENERATIVO (COSECHA)**

FERTILIZACIÓN CARBÓNICA A TARDE DEL AGUA DE RIEGO:
 $\text{CO}_2(\text{gas}) + \text{CO}_2(\text{exsurg}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$

FERTILIZACIÓN CON MPA_(sol) PROPORCIONA LOS ELEMENTOS:
 $\text{SILIFERTIDOL}^\circ + \text{CO}_2(\text{exsurg}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Fe}^{2+}$
 $+ \text{Zn}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{SiO}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_2(\text{gas})$

**EL 90% DEL PESO SECO DE LA COSECHA ES CO_2 Y EL SILICIO
FORMA PARTE DEL SISTEMA: DE PROTECCIÓN BIOTICA Y
ABIOTICA, LA CAPTURA DE CO_2 , LA ACUMULACIÓN Y
MÓVILIZACIÓN CARBOHIDRATOS**



EL FLUJO DE SILICIO EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS Y SU IMPORTANCIA EN EL DESARROLLO Y LA PRODUCTIVIDAD: CASO CULTIVO DEL MAÍZ

El silicio se encuentra en la parte sólida de los suelos, como componente de una gran diversidad de minerales primarios (MP), creando concentraciones de 25 a 28% de silicio elemental o bien de 700 a 800 ton/ha en la capa arable de 25 cm. La liberación a la fracción soluble del suelo forma parte del proceso productivo de los cultivos, teniendo impactos en la certidumbre de cosecha y mejoras en el rendimiento, sanidad del cultivo y calidad de cosecha. Este proceso geoquímico, importante en la formación y productividad de los suelos, se inicia con la acción del agua de lluvia o de riego sobre los MP's. Aquí resulta vital el tiempo de contacto o residencia de la humedad con los MP's, la temperatura mientras el agua reacciona sobre los MP's y el bióxido de carbono soluble ($\text{CO}_{2\text{acuoso}}$) en el agua, suministrado por la concentración de ácido carbónico (H_2CO_3). La carbonatación del agua se logra por la disponibilidad de bióxido de carbono ($\text{CO}_{2\text{gas}}$). Este es proveído por la respiración de los microorganismos del suelo al descomponer la materia orgánica, por la respiración de la raíz y por la concentración de $\text{CO}_{2\text{gas}}$ de la atmósfera. Adicionalmente,

se conoce que la diversidad y el desarrollo de la flora microbiana benéfica del suelo son estimulados por la presencia del silicio soluble, el ácido ortosilícico (H_4SiO_4). El H_4SiO_4 soluble forma complejos con los cationes que componen los minerales, promoviendo la movilización, distribución y asimilación por el área radicular de la cubierta vegetal. Estos son los inicios de la agricultura productiva, especialmente la orgánica. Este proceso inicial, conocido como intemperización, debe ser incorporado como una práctica benéfica en el proceso productivo agrícola, siempre y cuando se mantengan niveles adecuados de MP's en el suelo a través de su remineralización. Este proceso de liberación de silicio como H_4SiO_4 , de los MP's, ha sido intensivo por muchos años en regiones de clima tropical con estaciones de abundante lluvia y alta temperatura, aunque también se observa en clima templado en regiones boscosas con lluvia abundante y alta densidad de cubierta vegetal. En ambos casos, el proceso de liberación de silicio sin la remineralización induce una alta concentración de aluminio y la acidificación de los suelos y con ello una cubierta vegetal improductiva con alta incidencia de enfermedades y plagas de insectos.

Como un ejemplo de la participación de los MP's ricos en silicio en el proceso productivo, se describen las demandas encontradas en el cultivo del maíz, tal como se muestra en la siguiente **tabla 1**.

Tabla 1. Niveles de silicio encontrados en la planta de maíz, cultivada en diferentes ambientes y regiones agrícolas. el análisis de tejido foliar se realizó mediante la técnica de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, con la microsonda Incax-Xight modelo 7373, acoplada a microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM 6480 LV, en el laboratorio del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Los resultados de minerales que componen el tejido se expresan en % de la muestra seca.

Tejido	Deficiente	Óptimo	Máximo
Hoja	0.09	3.00	5.00
Tallo	0.25	0.50	0.70
Olote (Raquis)	0.08	0.20	0.40
Semilla	0.01	0.03	0.08

Como se observa, la mayor demanda se presenta en la hoja, con un nivel óptimo de 30.0 g silicio/kg de peso seco, seguida del tallo con 5.0 g/kg, el raquis u olote con 2.0 g/kg y la semilla con 0.3 g/kg. Los niveles óptimos están basados en el rendimiento de semilla superior a los 12 ton/ha, en plantaciones de alta densidad, riego y aplicación de fertilizantes.

En la siguiente figura y **tabla 2**, se muestran de manera ilustrativa alguno de los minerales primarios que forman parte del suelo agrícola, y que son la fuente de silicio para la nutrición del cultivo de maíz, observando que podemos encontrar una gran distribución en la concentración de silicio, así mismo de cationes, calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), etc. En la misma tabla se muestran minerales secundarios como la calcita, dolomita y gibbsita, los cuales son el producto de minerales primarios después de que el silicio y cationes son removidos.



Tabla 2. Composición elemental de diferentes minerales que pueden ser encontrados en el suelo, dependiendo de su origen y grado de erosión. Los datos se expresan en % del peso seco del mineral (pm = peso molecular).

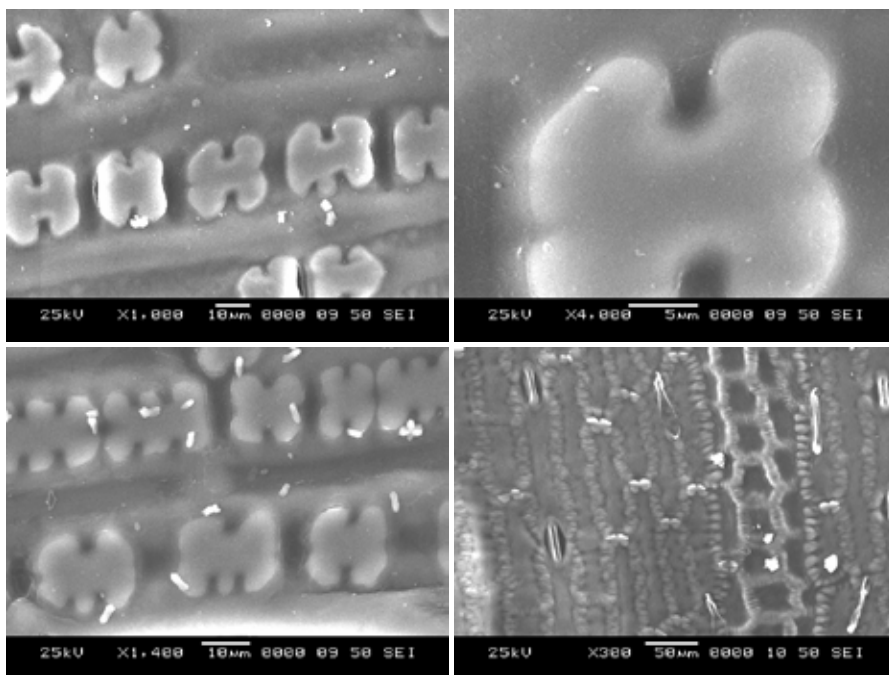
Mineral	PM g/mol	Si	O	Al	Ca	Mg	H	Fe	K	Na	C
Cuarzo	60.08	46.74	53.26								
Albita	263.02	31.50	48.66	10.77	0.76					8.30	
Ortoclasa	278.33	30.27	45.99	9.69					14.05		
Microclina	278.33	30.27	45.99	9.69					14.05		
Talco	379.27	29.62	50.62			19.23	0.53				
Enstatita	200.78	27.98	47.81			24.21					
Tremolita	812.37	27.66	47.27		9.87	14.96	0.25				
Diópsido	216.55	25.94	44.33		18.51	11.22					
Magnesio homblenda	821.16	23.94	46.76	5.75	9.76	11.84	0.25	1.70			
Augita	236.35	22.48	40.62	4.57	15.26	9.26		4.73		0.97	
Caolinita	258.16	21.76	55.78	20.90			1.56				
Moscovita	398.71	21.13	47.35	20.30			0.46		9.81		
Montmorillonita	549.07	20.46	64.11	9.83	0.73		4.04			0.84	
Biotita	433.53	19.44	43.36	6.22		14.02	0.41	6.44	9.02		
Olivina	153.31	18.32	41.74			25.37		14.57			
Epidotas	519.30	16.22	40.05	3.90	15.44		0.19	24.20			
Alófana	225.11	16.22	57.57	23.97			2.24				
Imogolita	198.08	14.18	56.54	27.24			2.04				
Clorita	1227.19	13.73	50.85	6.60	1.96	9.90	2.30	13.65	0.64	0.37	
Vermiculita	504.19	5.57	50.77	23.01		8.68	2.00	9.97			
Calcita	100.09		47.96		40.04						12.00
Dolomita	184.40		52.06		21.73	13.18					13.03
Gibbsita	78.00		61.53	34.58			3.88				

El silicio que se libera de los MP's por la acción del agua y del CO_2 ^{gas} forma en solución el ácido ortosilícico, el cual es un gran intercambiador y transportador de cationes, tanto en el suelo como en los tejidos de la planta. De manera ilustrativa, se muestra esta interacción en la figura siguiente:

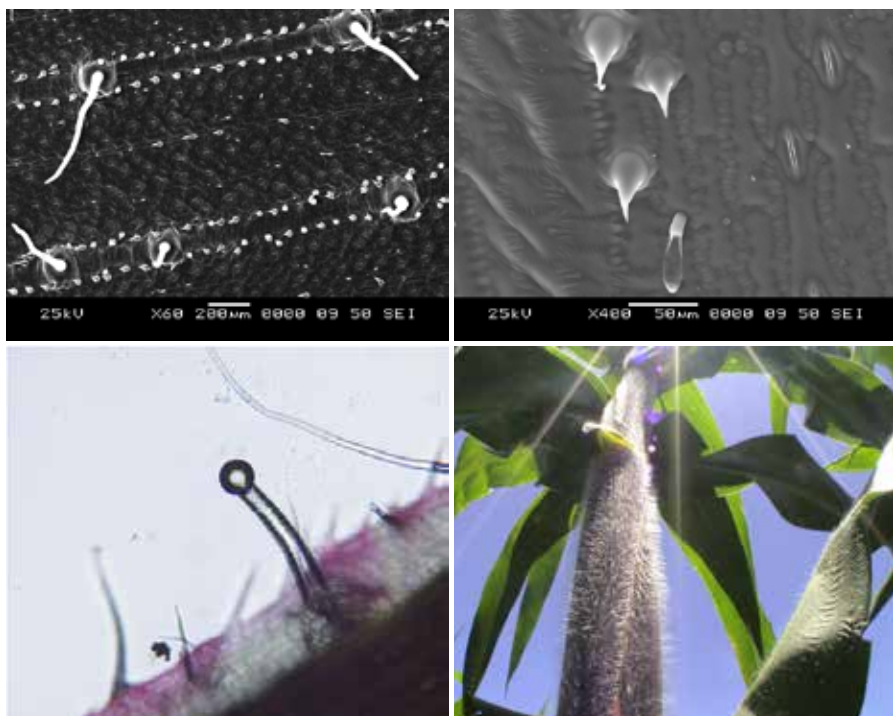


Las moléculas de ácido ortosilícico, ahora en interacción con cationes (ortosilicatos), viajan en los tejidos distribuyendo minerales, para finalmente viajar, principalmente, con el agua de transpiración a la cutícula de las hojas. El ácido ortosilícico aquí forma estructuras sólidas y semisólidas, como son los fitolitos y tricomas, respectivamente. Ello hace que se encuentre de 5 a 7% de silicio en la cutícula de la hoja del maíz. Los tricomas y fitolitos pueden contener del 25 al 30% de silicio como parte de su composición.

Los fitolitos tienen una forma de 8 con un tamaño de 10 a 15 μm (micras) de largo por y prácticamente lo mismo de ancho y un espesor de aproximadamente 1 μm . Presentan un arreglo de líneas a todo lo largo de la hoja, por lo que, cuando se obtienen niveles óptimos de silicio, cubren aproximadamente el 40% de la superficie del haz de la hoja. También los fitolitos cubren el envés de la hoja del maíz, pero en una menor concentración y parecen estar relacionados con la densidad estomática. En las siguientes cuatro figuras, obtenidas en un microscopio electrónico de barrido, Jeol JSM 6480 LV, se muestra a los fitolitos presentes en el haz de la hoja de maíz.



Los tricomas en las hojas del maíz pueden medir de 0.2 a más de 1.0 μm ; su longitud y densidad aparentemente dependen de la concentración de silicio disponible en el suelo. Se postula que estos tricomas tienen una actividad importante en la liberación de terpenos que la planta emplea para el control y combate de insectos. Por otro lado, los tricomas se encuentran arreglados en líneas prácticamente perfectas, a todo lo largo y ancho de la hoja. Ellos se pueden observar visualmente a trasluz, y una mayor densidad y longitud de tricomas se relaciona empíricamente con mayor productividad. Es importante destacar que las hojas nacen contando ya con fitolitos y tricomas. Ello tiene correlación con mejor germinación cuando en el entorno de la semilla está presente el silicio. En las siguientes figuras se muestra a los tricomas presentes en el haz de la hoja del maíz.



En la práctica en campo de cultivo de maíz, se han realizado aplicaciones de mineral primario amorfo rico en silicio (MPA_{Si}), observando una alta consistencia en la participación del silicio en la productividad del maíz, la mejor nutrición mineral y la sanidad de cultivo y cosecha. Resultados similares se han obtenido en la producción de frijol, chile, tomate, papa, aguacate, fresa, frambuesa, caña de azúcar, pastos y alfalfa. También se han aplicado MPA_{Si} en el cultivo hidropónico (tomate, chile, pepino), donde el silicio ha permitido mejorar significativamente los beneficios del invernadero.

NUTRICIÓN CON SILICIO Y SUS APLICACIONES A CULTIVOS A CIELO ABIERTO Y EN AGRICULTURA PROTEGIDA: UN PEQUEÑO RECORRIDO POR LA NATURALEZA

El silicio (Si) es un elemento químico metaloide, número atómico 14 y masa molecular $28.0855 \text{ g mol}^{-1}$, y segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, tal vez por ello no es considerado como un elemento esencial para el desarrollo sustentable de los organismos fotosintéticos, y ha sido un tema de gran debate. Nosotros aquí expondremos brevemente el ciclo biogeoquímico del Si en los ecosistemas fotosintéticos. Iniciaremos nuestra discusión a partir de la descripción de los cuerpos de sílice ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), continuando con los procesos biológicos, fisiológicos y productivos relacionados con el Si y concluiremos con el origen mineral del Si soluble. La esencialidad de los elementos minerales para el desarrollo confortable y productivo de los vegetales se ha basado en tres principios que se enuncian a continuación:

Justus von Liebig, (1840): La ley del mínimo dice que el nutriente que se encuentra menos disponible es el que limita la producción, aun cuando los demás estén en cantidades suficientes.

Arnon, D.I. and Stout, P.R. (1939): Un elemento es considerado no esencial a menos que (a) una deficiencia de este hace imposible para la planta completar el estado vegetativo o reproductivo de su ciclo de vida; (b) tal deficiencia es específica del elemento en cuestión, y puede ser prevenida y corregida sólo por aportar este elemento, y (c) el elemento está directamente involucrado en la nutrición de la planta, muy independiente de sus posibles efectos en corregir algunas condiciones desfavorables microbiológicas y químicas del suelo y otros medios de cultivo.

Epstein, E. and Bloom, A. J. (2003): Un elemento es esencial si cumple alguno de estos criterios o ambos: (1) El elemento es parte de una molécula que es un componente intrínseco de la estructura o metabolismo de una planta; (2) la planta puede ser severamente depletada del elemento, de tal forma que muestra anormalidades en su crecimiento, desarrollo y reproducción –más que en su rendimiento– en comparación con plantas que no están depletadas.

Con nuestra discusión no pretendemos rebatir estos enunciados, pero sí describir como el Si se moviliza en la productividad de los ecosistemas fotosintéticos, aportando materiales que requieren de una regulación metabólica, para crear confort en el comportamiento de los procesos biológicos y respuestas fisiológicas que ocurren en la producción agrícola.

CUERPOS DE SI EN LAS PLANTAS

Fitolitos: Muchos organismos fotosintéticos, bacterias, algas y plantas, acumulan sílice en forma sólida a través del proceso de biosilificación, creando, de forma intracelular y extracelular, cuerpos de sílice amorfos, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, algunas veces descritos como fitolitos y ópalo.

Estos cuerpos están inextricablemente unidos y/o son esenciales para el crecimiento, fuerza mecánica, rigidez, defensa de predadores y hongos, elasticidad, regulación metabólica y térmica, permitiendo un crecimiento confortable de las células, órganos y tejidos de las plantas. La sílice formada en los sistemas biológicos es un óxido inorgánico amorfo hidratado ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), también descrito como sílice biogénico (BSi), formado por el proceso de polimerización del ácido ortosilícico (H_4SiO_4) dentro de los organismos fotosintéticos.

Los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, llamados fitolitos-ópalo (*phyto*, planta y *lithos* roca, en griego) son producidos por las plantas, cuando la forma soluble de sílice, H_4SiO_4 , está presente en el agua contenida en el espacio intersticial del suelo, en un rango de concentración de 1.0-1.5 mM (96-144 mg l^{-1}). Este es absorbido por el transporte activo y pasivo de las raíces y transportado a diferentes partes del sistema planta a través del sistema vascular y por intercambio entre las células, mediado por proteínas de membrana específicas para el transporte de H_4SiO_4 , del tipo acuaporinas. Cabe mencionar que algunas plantas forman y acumulan fitolitos no silíceos, tal como el oxalato de calcio (cistolitos), por lo que en el presente texto a los fitolitos formados con $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ los enunciaremos como cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

La precipitación y polimerización del H_4SiO_4 en las plantas son auxiliadas por el metabolismo del agua, que ocurre en los tejidos de la planta; flujo, transpiración, potencial hídrico y óxido-reducción, que conduce a la formación intra y extracelular de cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Intracelularmente, el Si se acumula en el citoplasma y la vacuola de la célula de la planta. Los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ son depositados en toda la planta, raíz, tallo, hoja, flores y frutos. Ellos sobreviven a la muerte y descomposición de la planta, son durables en el suelo y ambientes secos y son morfológicamente distintos y sobre todo abundantes, de tal forma que pueden constituirse en la principal fuente de Si para satisfacer los requerimientos de las plantas. Los depósitos de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ocurren como partículas con formas características, como mancuernillas, silla

de montar, bolos y otros. Mayormente se encuentran en la epidermis foliar de las plantas, y ocurren de manera ordenada y estructurada en gran número, logrando cubrir más del 50% de la superficie foliar expuesta directamente al sol (haz de la hoja). Algunos cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ típicos de la epidermis foliar de maíz, arroz y frijol se muestran en la **figura 1**. La superficie de los fitolitos se observa con huecos irregulares o poros, así como también superficie sólida, con texturas que presumiblemente son moldeadas desde los espacios intra y extracelulares de los cuales ellos provienen. En general, los fitolitos tienen un tamaño entre 10 y 30 μm y ocasionalmente superan las 200 μm . Algunos cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ son perfectamente intrincados, y hermosos, con un tamaño nanométrico, como es el caso de las frústulas de las diatomeas que se muestran en la **figura 2**.

En una hectárea de cultivo de maíz, tradicionalmente manejado bajo riego, se ha estimado que los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ pueden cubrir un poco más de 1,800 m^2 y pesar 209 kg. Esta cantidad es igualada por el cultivo de soya y frijol, y se supera por mucho en los cultivos de arroz, trigo, cebada, avena, caña de azúcar y pastos. Aunque otros cultivos como pepino, calabacita, sandía y melón producen cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, no muestran asimilación que supere al arroz en los ecosistemas.

Figura 1. Cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, fitolitos y tricomas de maíz, arroz y frijol.

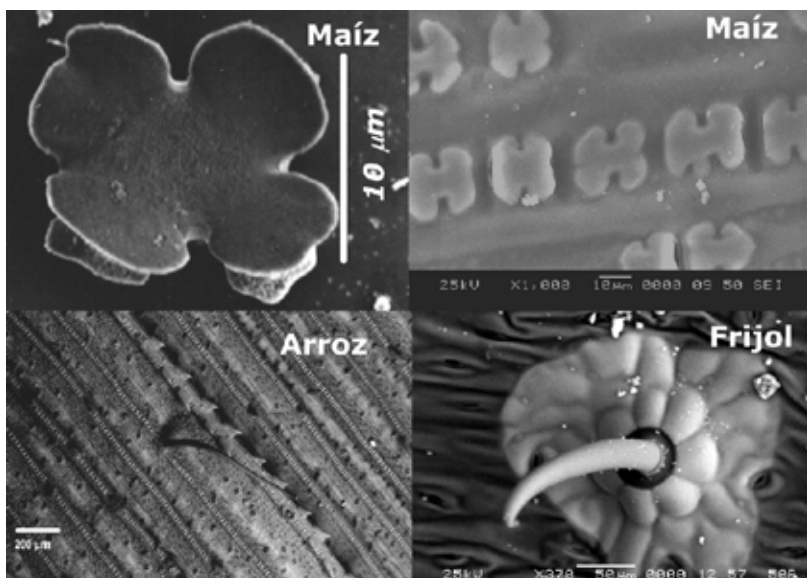
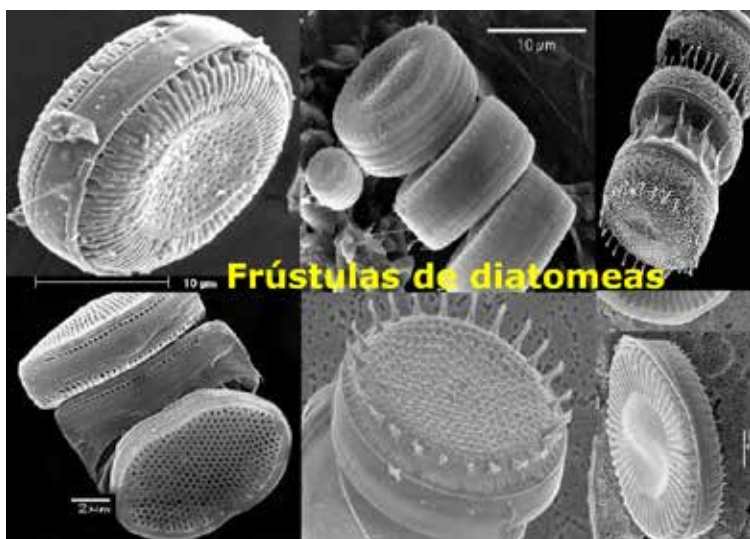


Figura 2. Cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ de diatomeas, frústulas.



FUNCIONES DE LOS CUERPOS- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ en las plantas sirven a variedad de propósitos, incluyendo el proporcionar rigidez estructural de soporte en el tallo, impidiendo el acame y dando fuerza mecánica y rigidez a las hojas. Esta dureza disuade a los depredadores y fortalece su capacidad de protección con una capa de “vidrio” o cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Ello no puede proveer alguna (indirecta) resistencia a mamíferos, tal como *Homo sapiens*. La evolución de los dientes del caballo se correlaciona con el incremento de contenido de cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ en los pastos, y estos hacen a algunas plantas desagradables y dan a sus tejidos una textura espinosa. Los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ también conservan el agua durante el estrés de humedad y sequía, mantienen a las hojas turgentes, y han mostrado que influyen el movimiento estomático en la epidermis de la hoja y en reducir la velocidad de transpiración de agua en maíz, arroz, frijol, etc. Otro importante efecto es la regulación térmica de la hoja, al permitir el paso de luz fotosintéticamente activa y tener un alto índice refractivo. Como cualquier vidrio, los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ son opacos a la radiación infrarroja de onda larga y ello permite mantener temperaturas confortables en las células de la hoja y mejorar la tolerancia a temperaturas gélidas.

Los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ promueven la elongación celular en la zona de crecimiento y decrece la extensibilidad celular en la zona basal del tejido estelar en las raíces y por ello incrementa su elongación. También mejoran de manera importante la tolerancia de las plantas a las enfermedades motivadas por hongos y toxicidad causada por metales. En resumen, la sílice ayuda a la planta a sobrevivir en muchos tipos de estrés abiótico, tales como salinidad, toxicidad por metales, desbalance nutricional, sequía, radiación, alta temperatura, congelamiento y luz ultravioleta, y reduce el impacto de predadores de la planta.

Los tricomas, células epidérmicas especializadas que forman pelillos o tricomas, son las únicas estructuras celulares de las plantas que, se conoce, están totalmente cubiertas por Si amorfo y que además mantienen actividad metabólica y posiblemente almacenan reservas para mantener el crecimiento. La concentración de estas células en la epidermis foliar resulta importante para su desarrollo, crecimiento y productividad. Las hojas de maíz forman tres diferentes tipos de tricomas: macrotricoma, tricoma espinoso y tricoma bicelular, que se producen en las filas de células estampadas en la epidermis adaxial. Aunque se producen con el inicio del crecimiento del tejido foliar, son muy visibles con el desarrollo de la quinta hoja. El tricoma más prominente, los macropelos o macrotricomas, sirven como una identidad para la hoja adulta y pueden contribuir activamente a la resistencia y protección contra depredadores.

La densidad, morfología y composición química de los pelos de la hoja varía ampliamente por factores nutricionales y ambientales, estos contribuyen a sus diversas funciones fisiológicas. Los pelos o tricomas pueden disuadir física y químicamente la alimentación de insectos, pueden proveer repelencia al agua y tienen propiedades de reflexión de la luz solar en la hoja. En algunas especies xerofíticas, pueden limitar la pérdida de agua debida a la transpiración. Los tricomas o pelos se forman a través de una especializada diferenciación de células epidérmicas y pueden ser unicelulares o ser compuestos por muchas células. En muchas especies de plantas, múltiples tipos diferentes de tricomas ocurren, y su producción varía durante el desarrollo del tallo o tejido con más de un tipo presente en la misma hoja. Aunque la función de los macrotricomas permanece sin claridad, se ha reportado que ellos influyen la oviposición por plagas de insectos. Se reportan de 190 a 500 tricomas cm^{-2} en hojas maduras de maíz. Se ha determinado que en su tamaño y densidad puede estar involucrada una respuesta genética.

Se ha reportado que los tricomas contienen de 9 a más de 80 mg g^{-1} de proteínas (con actividad enzimática para la producción de compuestos

volátiles-terpénicos), azúcares totales de 10 a 20 mg g⁻¹, azúcares reductores de 4.5 a más de 10 mg g⁻¹, almidón de 17 a 55 mg g⁻¹. En especial en arroz (*Oryza sativa*) y trigo (*Triticum vulgare*), se encuentran 74 y 84 mg g⁻¹ de proteínas, almidón 17 y 43 mg g⁻¹ y azúcares reductores 4.7 y 52 mg g⁻¹, respectivamente.

En hojas de plantas de fresa (*Fragaria anannassa*) se encuentran dos tipos de tricomas. Los unicelulares simples, lagos y delgados, localizados principalmente en las venas y márgenes de las hojas, mayormente en el envés de las hojas. Los segundos son tricomas glandulares, uniseriados, pequeños, multicelulares. Estos tricomas en la epidermis constan de una célula basal, varias células tallo y una simple célula redonda en la cabeza. En fresa, los tricomas permiten la resistencia al ataque de araña de dos manchas (*Tetranychus urticae* Koch). En el envés de las hojas se encuentran de 100 a 300 tricomas unicelulares cm⁻², mientras que en el haz se observan unos 25 tricomas cm⁻².

Otros tricomas, los capitata, secretan sustancias lipofílicas y polisacáridos, mientras que tricomas glandulares peltata secretan sustancias lipofílicas (compuestos volátiles con alta presión de vapor). En los plastidios, organelos que producen sustancias lipofílicas, principalmente terpenos y en los dictiosomas se sintetizan polisacáridos. La exocitosis es el principal camino para la secreción de sustancias al espacio subcuticular.

En órganos vegetativos, las sustancias volátiles de las plantas pueden ser sintetizados en la superficie de tricomas glandulares y ser secretados de las células y almacenados en sacos creados por la extensión de la cutícula.

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS ESTRUCTURAS SiO₂·nH₂O VEGETALES

El SiO₂·nH₂O sólido amorfo, que compone a los fitolitos de la pared de las células de la epidermis de la planta, es ópticamente isotrópico que dispone de un índice refractivo de 1.42 a 1.44. Con un rango de color

bajo transmisión de luz va de incoloro, marrón ligero a opaco. Muchos fitolitos son notablemente transparentes, lo cual hace posible ver a través de ellos y examinar formas tridimensionales y otras características sin cambio en la realización con el medio. Asimismo, los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ pueden contener de 4 a 9% de agua, y también pueden contener pequeñas cantidades de minerales: Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Ti, K, P, Zn, Cu y N, considerados “contaminantes”. A estos se les han atribuido propiedades ópticas y de dureza e insolubilidad, además posibles efectos en respuesta a su relación con el medio ambiente, pero ello hay que estudiarlo más. Por otro lado, dada la pequeña cantidad de nitrógeno, se encontró presencia de proteínas, mas no de material genético.

Algunas de las propiedades físicas y químicas de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ se muestran en la **tabla 1**, y destaca que la densidad, dureza e índice refractivo tienen valores inferiores a los observados en cuarzo (SiO_2). El índice refractivo para el H_2O es de 1.333, vidrio 1.52-1.66 y para el diamante 2.419, por lo que los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ con índice refractivo de 1.42-1.44, en la epidermis del haz de las hojas, permiten el paso de la luz y su difracción, eliminando efectos de la luz ultravioleta, minimizando el agobio fisiológico causado por una alta radiación solar, y aportan mayor calidad de luz al incrementar la radiación solar fotosintéticamente activa, mejorando la asimilación de $\text{CO}_{2\text{gas}}$. Por su dureza de 5.5. a 6.5 en la escala de Mohs, estos se pueden rayar con cuchilla de acero y difícilmente con un cuchillo, siendo importantes para proporcionar a los tejidos que los contienen, rigidez, y estructura y ser una barrera física contra depredadores. Otras características son la mayor superficie específica ($120 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y alta hidratación, lo cual permite actuar como barrera física impidiendo la pérdida de agua por evaporación y transpiración (muchos estomas tienen cubierta de sílice), y potencialmente almacenar 90 mililitros de H_2O por cada kilo de cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y mantener humectado al tejido foliar. Adicionalmente, esta superficie específica cuenta con carga iónica, tal como lo indica su punto isoeléctrico, pH_{iso} , que varía entre 1.2 y 2.5; ello muestra que su superficie es anfótera y que, bajo las condiciones de pH que ocurren

normalmente en los tejidos, tiene en su superficie gran actividad iónica negativa, por lo que es posible que ocurra el intercambio catiónico y metabólico, tal como ocurre en los tricomas de la epidermis foliar. Como se menciona arriba, los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ cubren $1,800 \text{ m}^2$ en una hectárea de maíz, por lo que resulta adecuado considerar el impacto de estas propiedades en la productividad y confort de los organismos fotosintéticos.

Tabla 1: Algunas características físicas y químicas de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Material	Densidad mg m^{-3}	Dureza Escala Mohs	Impureza g kg^{-1}	Índice Refractivo n	Superficie Específica $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	Punto Isoeléctrico pH	Hidratación g kg^{-1}
Cuarzo	2.65	7.0	Traza	1.55	2	2.0	--
Ópalo geoquímico	2.20-2.38	6.5-7.0	Traza a <50	1.47-1.48	--	1.0-2.5	10-30
Fitolitos	1.5-2.3	5.5-6.5	<150	1.42-1.44	120	1.2-2.5	40-90

Resulta también destacable que los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ pueden secuestrar carbono dentro de su estructura y ello puede ser una forma de almacenamiento de carbono por un periodo largo de tiempo y formar parte del ciclo de carbono en la Tierra. La cantidad estimada de carbono que los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ pueden secuestrar es del 5% de su peso, aunque algunas observaciones muestran que se puede superar el 10%. Este tema lo trataremos más adelante.

SOLUBILIDAD DE LOS CUERPOS- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Aunque los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, constituidos principalmente por $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ micrométrico, muestran un importante control en el ciclo del silicio en ambientes de la superficie continental, sus propiedades termodinámicas y reactividad en soluciones acuosas son pobremente conocidas. En los siguientes párrafos discutiremos la solubilidad y velocidad de disolución de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

La solubilidad de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ es de 0.140 g l^{-1} (140 ppm o 2.34 mM) a 25°C , y es 18 veces más alta que la del cuarzo, como se muestra en la **figura 3**. La solubilidad se mejora con temperaturas superiores a 35°C y obedecen al pH de la solución, observando que valores superiores a $\text{pH}=7.0$ presentan una solubilidad superior a 8 mM (480 ppm). Una respuesta típica de disolución de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ colectados de tejidos en crecimiento se muestra en la **figura 4**; se muestra también que ellos se solubilizan en 20 días, resultado que es importante para el desarrollo de las prácticas de manejo del suelo, sobre todo cuando se practica la “labranza cero”. La solubilidad en el suelo se inicia cuando ocurre la saturación del suelo con agua a capacidad de campo, y, mientras esta condición se mantenga, los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ se disolverán y contribuirán con la nutrición de la planta. Este proceso se favorecerá con las condiciones de temperatura y pH mencionadas antes. Algunas prácticas agrícolas favorecen este importante proceso de solubilización del sílice-BSi y el geoquímico, como son el riego por goteo, acolchado de suelos y la hidroponía, que mantienen la humedad del sustrato y suelo y mejoran la temperatura. En climas calurosos y tropicales, estas condiciones ocurren frecuentemente, por lo que el sílice BSi y el geoquímico son solubles y saturan la solución del suelo con H_4SiO_4 y sus especies iónicas H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, siempre y cuando exista la presencia de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) en el entorno radicular. Una consecuencia de la alta solubilidad del sílice geoquímico contenido en los MPA_{Si} y en los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ es el empobrecimiento de los suelos y la ocurrencia de condiciones de pH ácidos entre 4.0 y 5.0, condiciones que limitan el desarrollo de sistemas vegetales, insolubilizan al Si y favorecen la disolución del aluminio (al), elemento tóxico para las plantas, resultando importante la remineralización de los suelos.

CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS DE LA SOLUBILIDAD DE LOS CUERPOS- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Algunas de las variables termodinámicas, como la energía libre de Gibbs estándar (G_f^0) y la entalpia estándar de formación (H_f^0), se pueden

consultar en bases de datos de libros de geoquímica. Aquí únicamente enunciaremos lo recientemente reportado para los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y en el apéndice anexo presentamos algunos de los valores reportados para los minerales que componen el suelo y que son fuente primordial de H_4SiO_4 .

El producto de solubilidad de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ del suelo, determinado a 25°C es $= 2.74$, y es igual al sílice vítreo y mucho más alto que el cuarzo ($= 4.0$), como se muestra en las **figuras 3 y 4**. Sorprendentemente, el cuarzo no es una fuente importante de H_4SiO_4 a causa de su pobre solubilidad. Recordemos que el principal componente de la arena (de río o mar) es el cuarzo y por ello no es fuente de Si para la nutrición vegetal. Derivado de estos valores se puede calcular la entalpía de disolución de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, que es de $= 10.85 \text{ kJ mol}^{-1}$, valor comparable al obtenido para SiO_2 geológico amorfo de $14.44 \text{ kJ mol}^{-1}$, pero el cual es significativamente más bajo que el cuarzo de $25.63 \text{ kJ mol}^{-1}$. Esto indica nuevamente la alta solubilidad de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Figura 3. Solubilidad de cuarzo y cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a 25°C .

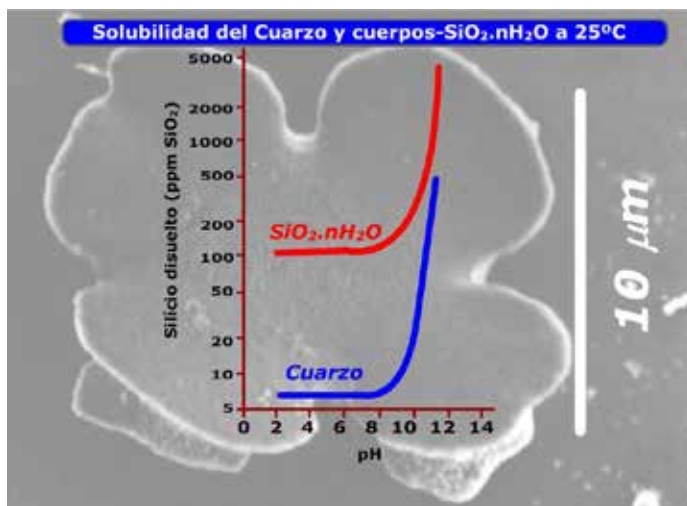
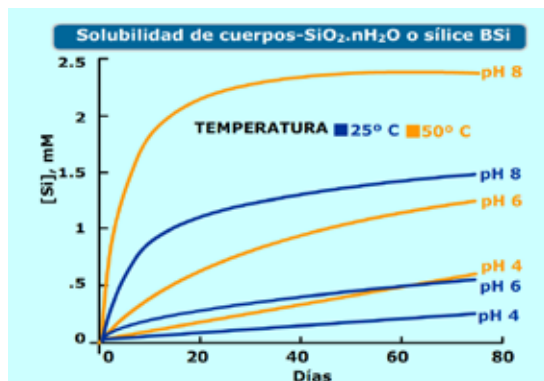
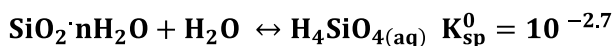


Figura 4. Solubilidad de cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.



Asumiendo que estos valores corresponden a las constantes de equilibrio entre los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y la solución acuosa, es posible calcular el producto de solubilidad de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (K_{sp}^0) según la ley de acción de masas:



Tomando en cuenta que el H_4SiO_4 es el producto de la primera hidrólisis, y que la concentración de $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ representa menos del 1% del Si total disuelto en las condiciones típicas del suelo (pH 6.0-7.0), tenemos la segunda ecuación de acción de masas:



Resulta que el balance de la solubilidad de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ es:

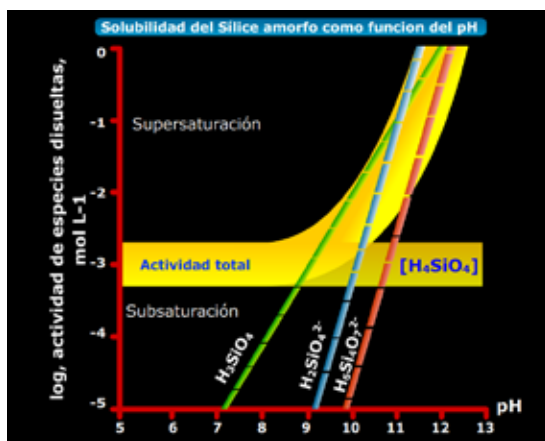


Donde $[i]$ entre los corchetes es la molalidad de especies solubles i . La combinación de las tres ecuaciones proporciona la expresión para K_{sp}^0 :

$$K_{sp}^0 = a_{\text{H}_4\text{SiO}_4^0} = [\text{H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})] = \frac{[\text{SiO}_2(\text{aq})]}{\left(1 + \frac{K_1}{\gamma_{\text{H}_3\text{SiO}_4^-} \times \alpha_{\text{H}^+}}\right)},$$

Con estas ecuaciones se construye la gráfica que se muestra en la **figura 5**, donde es claro que, para lograr la mayor solubilidad de especies solubles de Si, es adecuado que las soluciones del suelo muestren un $\text{pH} > 7.0$. En general, se ha observado que la productividad agrícola es exitosa en suelos “alcalinos” con pH de 7.5-8.0, como los observados en regiones agrícolas del norte de México y el sur de Chile, donde la producción de maíz supera las 15 ton/ha. Resulta paradójico que en general se trate de acidificar a los suelos (pH 5.5-6.5) aplicando soluciones ácidas. Por otro lado, en muchas ocasiones se aplican agentes alcalinos como es el carbonato de calcio (CaCO_3) que puede incrementar el valor del pH, sin embargo, no se toma en cuenta la disponibilidad de MPA_{Si} y de cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, por ello los resultados con este tratamiento son erráticos.

Figura 5. Efecto del pH en la solubilidad del Si amorfo.



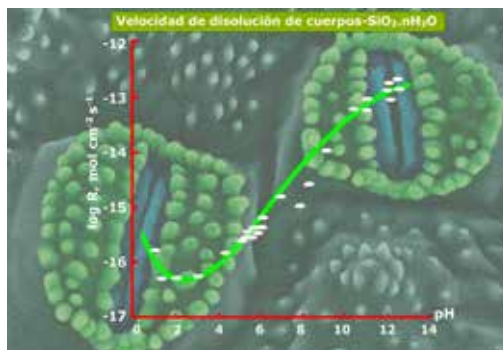
Un tratamiento mecánico de todas las velocidades de disolución de los cuerpos- $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ de las plantas proporcionó tres parámetros de un modelo matemático, bajo el concepto de la teoría de superficies de coordinación, asumiendo que la velocidad es proporcional a la concentración de especies $>\text{SiOH}_2^+$, $>\text{SiOH}^0$ y $>\text{SiO}^-$, suficientes para describir la reactividad de ellos en soluciones acuosas.

La ecuación obtenida se muestra enseguida y se presenta gráficamente en la **figura 6**:

$$R(\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}) = 6.0 \cdot 10^{-16} \cdot a_{H^+} + 5.0 \cdot 10^{-18} + 3.5 \cdot 10^{-13} \cdot a_{OH}^{0.33}$$

Este modelo de disolución para los cuerpos-SiO₂·nH₂O tiene una gran dependencia del pH en la solución, mostrando un mínimo a pH~3. La velocidad de disolución de masa normalizada es similar para la mayoría de las especies de plantas estudiadas, y estas velocidades están en el orden de magnitud más alta que aquellas que son típicas para minerales arcillosos del suelo. La vida media para cuerpos-SiO₂·nH₂O en la solución intersticial del suelo está en el rango de 10-12 años a pH=2-3, 0 y menores a un año a pH arriba de 6, comparable con el tiempo medio de residencia de cuerpos-SiO₂·nH₂O en el suelo de ecosistemas naturales. Este comportamiento se observa en la velocidad de disolución de los cuerpos-SiO₂·nH₂O en agua fresca y marina que es de 2.5-4.5 y 17-18 mmol g⁻¹ h⁻¹ (150-270 y 1,020-1,080 mg g⁻¹ h⁻¹), respectivamente, y para frústulas de diatomeas bajo las mismas condiciones es de 0.9 y 4.0 mmol g⁻¹ h⁻¹, respectivamente. Note la gran diferencia en disolución. Por ello, la disolución de sólo 0.1-1.0% del total de los cuerpos-SiO₂·nH₂O del suelo es suficiente para proveer la concentración de H₄SiO₄ y sus especies iónicas observados en aguas superficiales.

Figura 6. Velocidad de disolución de los cuerpos-SiO₂·nH₂O.



Los ecosistemas fotosintéticos son capaces de movilizar el Si y otros elementos que se han solubilizado por efectos de intemperización abiótica –agua, temperatura y viento– de los MPA_{Si} contenidos en el suelo. Por lo que la erosión biológica acelera el ciclo de los elementos en las plantas, y tal actividad es marcadamente diferente al efecto causado por los procesos abióticos. Este efecto es fuertemente controlado por la descomposición de los desechos orgánicos (materia orgánica) dentro del horizonte superior del suelo, donde la mayoría de los elementos contenidos en la planta son liberados en la solución del suelo.

EFFECTOS BENÉFICOS DEL SI EN EL ESTRÉS ABIÓTICO

El Si promueve el crecimiento y desarrollo confortable de los organismos fotosintéticos, sin embargo, no se encuentra en la lista de los elementos esenciales, aunque también se conoce su efectividad en aliviar condiciones de agobio abiótico como toxicidad por manganeso, aluminio y metales pesados (Pb), salinidad, sequía, heladas y congelación. El mecanismo de adaptación, tolerancia y resistencia al estrés mediado por Si es pobremente entendido. Los mecanismos claves del alivio mediado por Si ante el estrés abiótico incluyen: (1) Estimulación del sistema antioxidante en los vegetales, (2) Acomplejamiento y coprecipitación de iones de metales tóxicos con Si, (3) Inmovilización de iones de metales tóxicos en el medio de crecimiento, (4) procesos de asimilación y (5) compartimentalización de iones metálicos dentro de las plantas.

El Si está presente como H_4SiO_4 en la solución del suelo a una concentración normalmente de 0.1 a 0.8 mM (9.61 a 76.8 mg l^{-1}), dos órdenes de magnitud con respecto a la concentración de fósforo (P) en la solución del suelo. En respuesta a la presencia de H_4SiO_4 en la solución, el Si se acumula en los diversos tejidos y órganos de los organismos fotosintéticos.

Se ha observado que la presencia de H_4SiO_4 en los tejidos induce una distribución uniforme de los compuestos que inducen toxicidad en las

plantas; esto seguramente lo realiza por reaccionar químicamente con ellos, formando especies iónicas, H_3SiO_4^- , por lo que es importante considerar la participación de las especies iónicas de H_4SiO_4 en la movilidad y distribución de los nutrientes catiónicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Fe^{2+} , Na^+ , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} . Por otro lado, se ha observado que el H_4SiO_4 reduce la concentración apoplástica de elementos tóxicos sugiriendo que modificar la capacidad de unión de cationes a la pared celular puede permitir un tránsito de cationes sin afectar la carga iónica de diversos compuestos metabólicos, como las proteínas.

La adición de H_4SiO_4 al medio de crecimiento de los organismos fotosintéticos decrece la permeabilidad de la membrana plasmática (MP) de las células de las hojas y significativamente mejora la ultra-estructura de cloroplastos, los cuales son gravemente dañados por la adición de NaCl, con la desaparición de la doble membrana en las grana, siendo desintegrada en la ausencia de H_4SiO_4 . También, en condiciones de estrés salino y de sequía, el Si incrementa la presencia y actividad de enzimas antioxidantes en tejidos de hoja y raíz: superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD), catalasa (CAT) y glutatión reductasa (GR) y la concentración de glutatión (GSH), pero suprime la concentración de malondialdehído (MDA), un compuesto que indica la oxidación y degradación de lípidos de la membrana. Así también, se observa en la membrana plasmática y tonoplasto de raíz estimulación de la actividad de H^+ -ATPasa y H^+ -Pasa, sugiriendo que el H_4SiO_4 puede influir en la estructura, integridad y funciones de la MP al limitar la peroxidación de lípidos de membrana. Esta hipótesis de que H_4SiO_4 decrece la peroxidación de lípidos en plantas estresadas por sales vía incrementar la actividad enzimática antioxidante y antioxidantes no enzimáticos (AA) se ha corroborado recientemente en experimentos con tomate, espinaca, arroz, cebada, trigo, pepino y maíz.

La mayoría de las enzimas del estrés oxidativo únicamente se han estudiado en cuanto a su actividad, siendo importante mayor trabajo sobre la regulación bioquímica y genética de estas.

Otras variables que muestran respuesta al H_4SiO_4 en condiciones de estrés abiótico son: resistencia estomática (RS), permeabilidad de membrana (MP), actividad de lipoxigenasa (LOX), acumulación de prolina (PRO), acumulación de H_2O_2 , actividad antioxidante no enzimática (AA) y ascorbato peroxidasa (APX), especies reactivas a oxígeno (ROX), dehidroascorbato reductasa (DHAR) y fotosíntesis (Pn). Las actividades de LOX y AA en general se incrementan, al igual que la actividad Pn, bajo las condiciones de estrés y presencia de H_4SiO_4 .

Aunque el Si no es considerado un elemento esencial para las plantas superiores, este se ha aceptado como un elemento benéfico para el crecimiento confortable y sano de muchas especies de plantas, particularmente gramíneas, tales como arroz, cebada, trigo y maíz, y caña de azúcar y algunas plantas ciperáceas, bajo condiciones de estrés abiótico. Se estima que una concentración 1.5 mM (144 mg l⁻¹) de H_4SiO_4 , en el medio de desarrollo de los organismos fotosintéticos, es adecuada para sostener su productividad.

MECANISMOS DE ASIMILACIÓN Y DEPOSICIÓN DEL Si

La concentración de Si varía grandemente en los organismos fotosintéticos, observando que la canopia de los cultivos (tallos, ramas y hojas), puede contener de 0.1 a 10% (1.0 a 100 g kg⁻¹) del peso seco, según estudios realizados desde 1840. Esta amplia variación en la concentración de Si en los tejidos de las plantas es atribuida principalmente a diferencias en las características de asimilación y transporte. En general, las gramíneas asimilan mucho más Si que otras especies, mientras que la mayoría de las plantas dicotiledóneas absorben Si pasivamente y algunas leguminosas excluyen silicio de asimilación, aunque plantas de frijol y soya tienen grandes acumulaciones de Si en los tricomas y existe una dependencia de la fijación biológica del nitrógeno al H_4SiO_4 . La asimilación y transporte de Si en arroz, un acumulador típico, ocurre mediante un proceso activo, pero algunas dicotiledóneas, tales como pepino, melón, fresa y soya, toman silicio pasivamente, y el tomate y el

fríjol muestran un mecanismo aún no bien establecido para la asimilación de H_4SiO_4 . Además de arroz, otras plantas gramíneas como trigo y cebada, ryegrass y ciperáceas asimilan el Si activamente, mientras otras gramíneas tales como avena asimilan el Si pasivamente.

Un rápido progreso se ha realizado recientemente en caracterizar la asimilación y transporte de Si en arroz empleando mutantes de arroz. Se ha mostrado que las raíces laterales juegan un papel importante en la asimilación de Si, mientras que los pelos radiculares no contribuyen en la asimilación. Generalmente, la presencia de H_4SiO_4 en el medio radicular de plantas cultivadas en suelo incrementa significativamente el diámetro y masa de las raíces secundarias. La asimilación de Si en arroz es un proceso específico mediado por un transportador proteico, el cual contiene residuos de cisteína, pero no de lisina, es una proteína no es inducible y tiene una baja afinidad para el H_4SiO_4 ($K_m = 0.32 \text{ mM}$). Además, un gene es responsable del llenado del xilema con H_4SiO_4 , recientemente el gene se ha mapeado en arroz empleando la mutante *Lsi1* (antes mutante GR 1) y está localizado en la membrana plasmática de células del lado distal de ambos exodermis y endodermis, constitutivamente se expresada en las raíces. El gene del H_4SiO_4 *Lsi1* codifica para una proteína de membrana similar a proteínas de canal de agua (aquaporinas). En contraste al rápido progreso que se ha realizado en caracterizar la asimilación de H_4SiO_4 en arroz, poca información está disponible en la asimilación de silicio y transporte en las otras monocotiledóneas y en dicotiledóneas. Más recientemente, se ha reportado que la concentración de H_4SiO_4 fue menor en el xilema más que en la solución externa de pepino (*Cucumis sativus* L.), sugiriendo que el llenado del xilema con H_4SiO_4 es mediado por un mecanismo de difusión pasiva. Sin embargo, se ha demostrado que en el pepino la asimilación y transporte son más un proceso activo. Tal discrepancia en la asimilación de silicio y llenado de xilema puede ser causada por los diferentes métodos usados para colectar el extracto del xilema y el manejo del cultivo de las plantas y/o diferentes cultivares estudiados. Parece que una intensa investigación es necesaria para caracterizar la

asimilación y transporte de silicio en *Cucumis sativus*. Recientemente se ha reportado que ambos, transporte activo y pasivo, están operando en la asimilación de H_4SiO_4 en el mismo acumulador de Si, arroz (*Oryza sativa*) y maíz (*Zea mays*) y en tipos de especies intermediarias: girasol (*Helianthus annuus* L.) y calabaza blanca (*Benincasa hispida*). La regulación de la asimilación de H_4SiO_4 es dependiente de las características genéticas y de la concentración de H_4SiO_4 disponible en el medio de crecimiento.

En maíz (*Zea mays*) y cebada (*Hordeum vulgare*) el H_4SiO_4 es tomado de la solución externa por un transportador de entrada (Zm Lsi1/Hv Lsi1) localizado en la capa de epidermis y corteza y transferido a la endodermis por transporte simplástico. En la endodermis el H_4SiO_4 es liberado por un transportador activo (Zm Lsi2 /Hv Lsi2) a la estela vascular, xilema-floema. En arroz (*Oryza sativa*) el H_4SiO_4 es asimilado de la solución externa por Os Lsi1 en las células de la epidermis y liberado al apoplasto del aerénquima por Os Lsi2 al lado proximal de las células endodérmicas. En esta planta el H_4SiO_4 es transportado por Os Lsi1 y Os Lsi2 a la estela vascular, como se muestra en la **figura 7**. Un similar transporte de H_4SiO_4 se encuentra en plantas de tomate (*Lycopersicum esculentum*) y pepino (*Cucumis sativus* L.). De manera importante se tienen evidencias de que el transportado Lsi2 posiblemente está involucrado en la producción de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$.

Figura 7. Proteínas de la membrana plasmática que transportan H_4SiO_4



En contraste, ZmLsi6 se expresa más en hoja, tanto en vaina como en lámina. Ambos no son afectados por los aportes de silicio. ZmLsi1 se localizó en la membrana plasmática del lado distal de la epidermis de la raíz, ZmLsi6 se encontró en las células del parénquima del xilema que son adyacentes a los vasos de vaina y lámina. Se ha propuesto que ZmLsi1 es el transportador para entrada de H_4SiO_4 , el cual es responsable para el transporte de la solución externa a las raíces, y que ZmLsi6 principalmente funciona como un transportador para el vaciado del xilema. Se ha observado que, al limitar la expresión de Lsi6, se reduce la producción de cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ en la epidermis, por lo que se cree que está involucrado en los mecanismos de biosilicificación, además resulta en un incremento en la excreción de H_4SiO_4 en el fluido de la gutación. Por lo tanto, biosilicificación específica depende del camino simplástico del H_4SiO_4 hecho por Lsi6 más que el camino apoplástico. En trigo se ha observado que en el xilema se encuentra ácido monosilícico y disilícico $[(\text{HO})_3\text{Si}(\text{O})\text{Si}(\text{OH})_3]$ en una proporción 7:1.

La expresión de las proteínas de transporte ocurre más en las partes maduras que en la región apical; también se ha observado que intensa demanda de H_4SiO_4 ocurre en el cultivo durante la germinación y de-

sarrollo de plántula y antes del espigamiento. Algunas variables de la cinética de asimilación se muestran en la **tabla 2**.

Tabla 2. Concentración de H₄SiO₄ en savia de xilema, y variables de la cinética de asimilación de H₄SiO₄ mM.

Planta	H ₄ SiO ₄ , mM en savia de xilema, con diferente aporte de Si en medio, mM		Cinética, K _m (mM) y V _{max} (mM Si g ⁻¹ ps raíz h ⁻¹)	
	0.15	1.5	K _m	V _{max}
Arroz	3.12	21.39	0.35	0.31
Cebada	1.02	6.13	0.38	0.12
Pepino	0.43	4.98	0.62	0.05
Tomate	0.06	0.42		

Los organismos fotosintéticos procesan Si en cantidades de gigatoneladas (1 gigatonelada=Gton=10⁹ton) por año, mientras que procesos industriales sólo producen algunas megatoneladas. Las plantas extraen H₄SiO₄ de un ambiente acuoso no saturado –a presión atmosférica y a una temperatura en un rango de 4 a 40°C–, el cual está en contraste a la generalmente extrema temperatura empleada en la extracción industrial requerida para el H₄SiO₄. Una mejor comprensión de la biodisponibilidad de cuerpos-Si₂nH₂O, y del proceso de asimilación del H₄SiO₄ que tiene lugar dentro de la planta, es crucial para la explotación de los beneficios que pude conferir en la productividad de los ecosistemas fotosintéticos.

La asimilación de H₄SiO₄ se ha estudiado en más de 500 especies de plantas, y, dependiendo del contenido de Si, las plantas pueden ser clasificadas como una u otra Si-acumuladoras (arroz [*Oryza sativa*], cola de caballo [*Equisetum arvense*], caña de azúcar [*Saccharum officinarum* L.], etc.), o Si-no acumuladoras (menos de 3 mg Si/g de materia seca), como la mayoría de dicotiledóneas, incluyendo leguminosas. Consecuentemente, las concentraciones de Si en el tejido de la planta varían considerablemente, de sólo 0.1% (base peso seco) en dicotiledóneas, a sobre 1-3% en gramíneas herbáceas, tales como avena (*Avena sativa* L.) y centeno (*Secale cereale*), y están arriba del 10-15% en la fa-

milia de las Gramineae, por ejemplo, en arroz y Cyperaceae (juncia). La asimilación de silicio se ha reportado como un proceso activo para arroz, fríjol y algunas especies de cotiledóneas.

Mediante análisis extensivo y sistemático, en tejidos de hoja, empleando el microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés) equipado con un microanalizador de energía dispersiva de rayos X, se reveló que el proceso de polimerización del H_4SiO_4 y su deposición dependen del tipo de células de la planta. Los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ en algunas plantas contienen glicoproteínas y residuos, y se presume que tales residuos, por lo menos en diatomeas, tienen un papel en la precipitación de H_4SiO_4 . La asimilación de H_4SiO_4 se ha investigado en trigo (*Triticum aestivum*) empleando técnicas de resonancia magnética nuclear (NMR), con el objetivo de identificar las especies moleculares que contienen Si. Sin embargo, sólo H_4SiO_4 , monomérico y dimérico fue detectado y allí no se encontraron componentes orgánicos con Si. Aunque otras plantas muestran alguna concentración de material orgánico, quizás celulosa y otros carbohidratos puedan vincularse químicamente con el Si, o bien, por la carga negativa de la superficie puedan estar entrelazados. Por lo tanto, parece que, al menos en algunas plantas, la precipitación de H_4SiO_4 sigue la nucleación sin proteínas. El mecanismo puede diferir entre tejidos.

Un examen del patrón de deposición de sílice en las células abaxiales de la epidermis de hojas de maíz, empleando microanálisis de rayos X y microscopía de fluorescencia, ha auxiliado a establecer la hipótesis de que la biosilicificación puede estar unida a *loci* que están involucrados en la lignificación. Se sugiere también que la deposición de Si es a decir verdad correlacionada en arroz con el *locus* genético, cascara dura (Hr), involucrado en la deposición de lignina. También se han propuesto modelos moleculares para el transporte de H_4SiO_4 en las plantas, que sugieren que la cinética de formación de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ y la regulación de estructura son influenciadas por una proteína rica en prolina (PRP1) y proteoglicanos. La proteína incrementa el reforzamiento

de la pared celular, proporcionando una barrera a la penetración de hongos, actuando como un catalizador de policondensación de H_4SiO_4 . Por lo tanto, la deposición de Si en las plantas puede envolver catálisis de superficie (cf. sedimentación en pared celular) sin compartimentalización de la catálisis enzimática dentro del cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, lo cual es un contraste a la compartimentalización enzimática vista en diatomeas. La extracción y caracterización de secuencias de aminoácidos y estructuras de proteínas de pared celular, su correlación con funciones definidas y el análisis de sus roles en la formación de cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, se requieren como ayuda para el entendimiento del proceso biológico de biosilicificación en los organismos fotosintéticos.

CRECIMIENTO DE LOS CUERPOS- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$

Aún no se cuenta con métodos establecidos para investigar la elucidación del crecimiento de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$. Se ha desarrollado un método analítico para caracterizar el patrón de crecimiento y ensamble de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ en las plantas, empleando un método de fraccionamiento programado campo-flujo (FPFF), método que puede superar al empleado para diatomeas. La solubilidad, propiedades de superficie (tales como movilidades electroforéticas y carga de superficie) y cinética de disolución de cuerpos biogénicos de Si extraídos de biomasa fresca de alerce (*Larix gmelinii*), olmo chino (*Ulmus laevis* Pall.), cola de caballo (*Equisetum arvense*), helecho arbóreo (*Dicksonia squarrosa*) y algunos pastos, y es muy similar al que tiene un SiO_2 sintético amorfo.

Muchas técnicas están disponibles para estudiar la estructura y composición química de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, incluyendo microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía de fuerza atómica (FAM), energía dispersiva de rayos X (EDAX), difracción de rayos X y procesos de separación bioquímica y fisicoquímica. Los procedimientos de separación bioquímica convencional para la extracción de cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, tales como

oxidación en fresco, ceniza seca y digestión ácida, frecuentemente se emplean para reducir la contaminación y la posibilidad de alterar el ensamblado de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$. La determinación de la concentración de Si, por métodos colorimétricos, absorción atómica y plasma de acoplamiento inductivo (ICP), son los métodos alternativos, mientras que SEM y EDXA son comúnmente empleados para investigación de las partículas de Si con mayor detalle. Aunque técnicas de difracción de rayos X pueden ser empleadas para la organización de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ al nivel de nanopartículas, TEM tiene comprobadas sus grandes ventajas para investigar partículas a nivel de tamaño nanométrico, la interacción y relativa orientación con su entorno, así también como para seguir cambios estructurales observados durante el desarrollo de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$.

Empleando espectroscopía de estado sólido Si NMR, se ha determinado que los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ de plantas consisten en general y mayormente de geles de SiO_2 hidratados con uniones Si-O-Si con ángulos menores que 145° , indicando una naturaleza amorfa. Las uniones del puente de oxígeno entre los átomos de Si proporcionan muchas de las magníficas propiedades del SiO_2 biogénico. SEM en combinación con EDAX se ha empleado para descubrir la composición mineral y otros componentes dentro de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ de los vegetales, por ejemplo, qué cantidad de carbón es secuestrado dentro de los cuerpos- $\text{SO}_2\text{nH}_2\text{O}$ y determinar los niveles de hidratación para estructuras individuales de tipos de cuerpos- $\text{SO}_2\text{nH}_2\text{O}$ dentro de una muestra heterogénea. La información estructural interna, tal como la fuerza de enlace e hidroxilación en el cuerpo- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, se estudia mediante espectroscopía de infrarrojo y espectroscopía de estado sólido NMR, permitiendo observar el ambiente que rodea los átomos de Si. Con las técnicas de difracción de rayos X, se ha empleado ángulo pequeño y amplio, ángulo de difracción de rayos X para determinar a nivel nanométrico la estructura de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ en la primitiva planta de cola de caballo *Equisetum arvense* y se ha encontrado una gran evidencia de

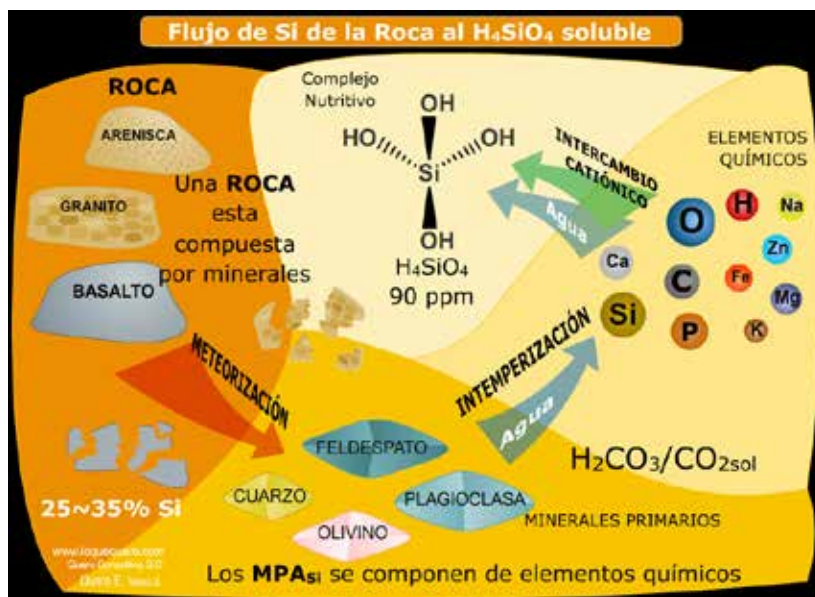
que la cristalinidad biogénica está hecha de Si amorfo, tanto en plantas como en diatomeas.

Empleando mapas espectrales bidimensionales de alta resolución ($< 1\text{mm}$) de microscopía Raman, la visualización directa de diferencias en composición química de un corte transversal de *Equisetum hyemale* se acompañó por microscopía de fuerza atómica (AFM), que se ha empleado para el análisis de la estructura de la pared celular de diatomeas, y una imprevista superficie granular nanoestructural reveló que se compone de una fusión de nanopartículas esféricas, que posiblemente corresponden a una “estructura granular a la escala nanométrica” en los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$. Este nivel de estructura puede representar fabricación de SiO_2 coloidal. En general, contrario a las diatomeas, excepto para esta posible fabricación de esferas de aproximadamente 50 nm de diámetro, estructuras regulares jerárquicas no se han observado en cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$.

CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL SI

El Si es un elemento común en la corteza de la Tierra, con el $\sim 25\%$ del peso seco de la parte sólida de la superficie del suelo, donde el oxígeno (O) es más del doble $\sim 54\%$. El ciclo global del Si comprende tres compartimentos, continental, oceánico y atmosférico, con una reserva variable a lo largo de su extensión, dependiendo de la intensidad del crecimiento de los organismos fotosintéticos, pero se estima que en los tres primeros metros de roca, la reserva continental es del orden de 380 Tton (1 Tton = 1 Tera tonelada = 10^{12} ton), la reserva oceánica es del orden de 2.5 Tton y la reserva atmosférica es limitada a las partículas presentes dentro de los aerosoles. Por otro lado, se estima que en la superficie terrestre los organismos fotosintéticos pueden producir de 1.7 a 5.1 Tkg año^{-1} de cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, mientras que en el océano se procesan 6.7 Tkg año^{-1} , aun cuando los suelos tienen un orden de magnitud más grande de Si, si bien ya muy variable.

Figura 8. Disolución del MPASi y la producción de H_4SiO_4



El Si soluble (H_4SiO_4) es producto de la meteorización e intemperización de las rocas (**figura 8**). El H_4SiO_4 es relativamente soluble dentro del agua (aprox. $10^{-2.7}$ mol kg^{-1} a 20 °C), y la concentración en el agua del suelo es controlada por la cinética de disolución de los MPASi presentes en las rocas y por la disolución/precipitación de los minerales secundarios del suelo, mayormente las arcillas. Por otro lado, la transferencia de los continentes al océano en la forma disuelta es de ~ 0.157 Tkg año^{-1} y en las rocas detríticas ~ 4.4 Tkg año^{-1} . En aguas continentales con pH entre 3 y 8, el silicio está en su forma de H_4SiO_4 , pero su disolución de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ y de las rocas ocurre adecuadamente a $\text{pH} > 7.0$.

Dentro de la solución del suelo, la concentración de H_4SiO_4 disuelto varía según el pH, siguiendo las variaciones de solubilidad de los aluminosilicatos; en condiciones ácidas, $\text{pH} < 5$, disminuye, y se incrementa a medida que el pH es neutro y alcalino. En las fronteras de la acidez las concentraciones son del orden de 0.10 mM a pH de 3.9 y del orden de

0.01 mM a pH 4.6. En las condiciones básicas, $\text{pH} > 7$, la concentración aumenta significativamente. La concentración mundial en las aguas de los ríos es del orden de $10^{-3.8} \text{ mol kg}^{-1}$, aunque la variación es grande en tiempo y espacio, por ejemplo, superior a $>300 \mu\text{M}$ en el río Paraná, intermedio $\sim 160 \mu\text{M}$ en el río Amazonas e inferior a $32 \mu\text{M}$ para el río Saint-Laurent ($>29, 15.4, 3.05 \text{ ppm}$). Ninguna de estas satisface las demandas de un buen suelo agrícola, que es de 90-150 ppm. En algunos ríos, como los de Hawái, se ha demostrado que la mayoría del H_4SiO_4 proviene de la disolución controlada de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$. Sin embargo, la extrapolación de los resultados a otros ecosistemas terrestres requiere ser confirmada.

El silicio es un elemento raro en la concentración de las aguas de los ríos y es generalmente superior a las aguas marinas (4 a 8 ppm). En los ríos y los océanos, constituye un nutriente generalmente limitante y su concentración es controlada por la actividad biológica del proceso de biosilificación. Sus precipitados forman parte de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ del ópalo de los organismos como diatomeas, radiolarios y esponjas; la sedimentación oceánica de BSi puede ser de $0.188 \text{ Gton año}^{-1}$.

La asimilación y almacenamiento del Si por los organismos fotosintéticos son controlados y regulados por el proceso de biosilificación y su reciclado en ecosistemas terrestres es un componente significativo en el ciclo biogeoquímico del silicio. Los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ son un *buffer* esencial entre la intemperización de los MPA_{Si} y el H_4SiO_4 y la eventual exportación al ambiente acuático. Los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ almacenados en los suelos como fitolitos y frústulas de diatomeas son varios órdenes de magnitud más solubles que silicatos minerales, y el reciclado de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ exhibe un control importante en la exportación terrestre de H_4SiO_4 . La movilización en el ambiente terrestre de H_4SiO_4 es la fuente primaria de Si para ambientes acuáticos y eventualmente costeros y oceánicos, donde es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos fotosintéticos como las cianófitas (*Cyanophyta*) y las diatomeas (*Bacilliarophyceae*), importantes en la captura de CO_2 y la

cadena trófica marina. La disponibilidad de H_4SiO_4 relativo a otros nutrientes puede influenciar la ocurrencia de un florecimiento perjudicial del fitoplancton. Además de la asimilación de H_4SiO_4 y la incorporación de las frústulas de diatomeas en el fondo del océano, son una importante demanda para carbón atmosférico en escalas de tiempo biológico. Además, la erosión de los MPA_{Si} terrestres es un mecanismo esencial para el control de la concentración atmosférica de CO_2 en escalas de tiempo geológico. El entendimiento del ciclo del Si basado en los MPA_{Si} es fundamental para comprender el ciclo biogeoquímico del carbón y la eutrofización.

Aún el control biótico de los flujos de Si basados en los MPA_{Si} (Tierra) está lejos de ser entendido. Cuantificar los componentes bióticos del ecosistema y su relación con la disponibilidad de Si es uno de los mayores retos para entender el ciclo biogeoquímico del Si. Por otro lado, ¿qué prácticas tecnológicas son adecuadas para mejorar el proceso de biosilicificación en favor del desarrollo confortable de los ecosistemas fotosintéticos y la mejora de la cadena trófica para el desarrollo sustentable de la biota terrestre? Por ejemplo, ante el calentamiento global, la urgente captura del CO_2 , y la investigación en ecosistemas terrestres, en gran parte enfocada a ecosistemas boscosos, donde la disolución de los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ se ha identificado como la fuente primaria para la exportación de H_4SiO_4 . Recientemente se sugiere, en la literatura, que los pantanos tienen potencial para mostrar una profunda influencia en el transporte y almacenamiento de Si. Los pantanos pueden modificar el flujo de nutrientes a la par del continuo acuático a través de la transformación y el almacenamiento. Biomasa rica en cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$, junto con la frecuente ocurrencia de diatomeas y esponjas en los pantanos, proporcionan el potencial para la acumulación de suelos ricos en Si. No es nueva la idea de que el H_4SiO_4 es reciclado por las plantas sobre el continente antes de su eventual transferencia a los océanos a través de los ríos. En los años recientes, las estimaciones cuantitativas confirmaron esta idea. La composición típica de cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ cuarzo y otros minerales se muestra en la **tabla 3**, y destaca el contenido de

carbón, motivo por el cual se considera que participan en la captura de CO_2 y lo pueden almacenar en el suelo por un periodo largo de tiempo.

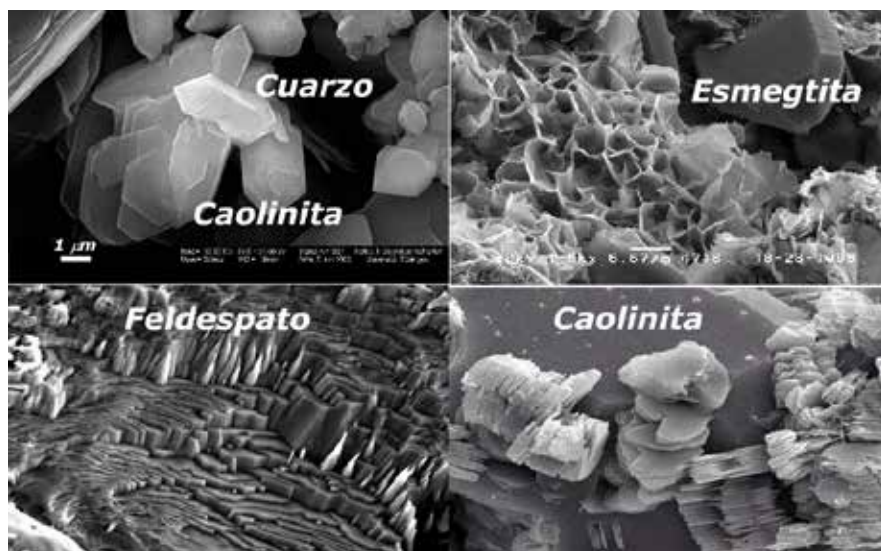
Tabla 3. Composición típica de cuarzo, tridimita y cuerpos $\text{Si}_2\text{n} \cdot \text{H}_2\text{O}$, g kg^{-1} .

Elemento	Cuarzo	Tridimita	Ópalo- SiO_2		
			cuerpos- $\text{Si}_2\text{n} \cdot \text{H}_2\text{O}$	Suelo	Geológico
SiO_2	>900	886-990	828-872	764-905	858-965
Al_2O_3	0.09-0.6	5-27	0.2-7.0	8.4-47	T-32.2
Fe_2O_3	0.01-7	T-19	T-5.6	1.8-13	0.8-18.5
TiO_2	T-0.7	0.2-8.6	T	T-3.0	--
CaO	0.007-0.14	2-4	T-15.5	<1-20.4	0.9-9.6
K_2O	--	0.8-7.5	T-9.0	1.4-9.7	7.5
Na_2O	ND-0.04	2.4-8.0	T-5.0	1.0-34.4	1.8
MgO	0.008-0.16	T-12.4	T-5.1	T-17.2	T-14.8
C	--	--	57.8	8.6	--
H_2O	--	--	38.3-76.1	42.6-121	32.6-94.0

SI EN LOS MPA_{Si} DEL SUELO

El contenido Si en los minerales del suelo, presentes en la capa superficial de 50 cm, puede ser para aquellos con un tamaño de partícula de 2 mm a 2 mm (arcilla a arena gruesa) de 1,290 a 1,940 ton Si ha^{-1} y en los minerales con partícula menor a 2 mm es 230 a 560 ton Si ha^{-1} . En esta misma capa se han cuantificado de 8.0 a 67 ton cuerpos- $\text{Si}_2\text{n} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ha^{-1} , en praderas sin disturbio ecológico, en la **figura 9** se muestra la forma típica de los minerales contenidos en el suelo.

Figura 9. MPA_{si} presentes en el suelo



Durante el desarrollo del suelo, el Si puede ser lixiviado, redistribuido o se acumula en los suelos. Se conoce bien la pérdida de Si (“desilicificación”) en suelos de clima húmedo y tropical. En suelos de clima templado o boreal, la pérdida de Si muestra un rango de 5.62 a 112.43 ton Si ha⁻¹ año⁻¹. En suelos del tipo podzoles, la pérdida anual estimada es de 5.62-70.27 ton Si ha⁻¹ año⁻¹, y en cambisoles y luvisoles, de 8.43-25.30 ton Si ha⁻¹ año⁻¹.

La composición elemental de los minerales primarios, que pueden integrar en diferentes porcentajes a un suelo, se muestra en la **tabla 4**. La presencia y concentración de elementos varía en ellos. En olivina se encuentran 391 g SiO₂ kg⁻¹ (180 g Si kg⁻¹), mientras que en alvita es de 656.3 g SiO₂ kg⁻¹ (306.8 g Si kg⁻¹). Otros elementos presentes, que se encuentran en diferentes concentraciones y que son empleados en la nutrición de los organismos fotosintéticos, son el calcio, magnesio, hierro, potasio, sodio y fósforo.

Tabla 4. Composición elemental de algunos minerales primarios que componen el suelo. La cuantificación se realizó con la técnica EDS-X y los resultados se expresan en % de muestras secas.

Elemento	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
SiO ₂	39.10	42.24	44.70	46.40	51.10	52.60	58.81	63.30	64.40	65.63
Al ₂ O ₃	2.13	37.68	38.45	34.14	2.38	29.07	27.16	21.30	20.78	22.37
Fe ₂ O ₃	2.75	0.36	0.01		8.62	0.49	0.34	0.14	0.04	0.04
FeO	4.85	0.37	3.82	0.49	0.08	0.26	0.22	0.06	0.34	0.03
MnO	0.04	0.01	0.03	0.01	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
MgO	49.25	0.39	0.72	0.33	13.03	0.54	0.07	0.36	0.03	0.02
CaO	0.18	17.04	1.00	13.99	23.50	12.00	3.61	1.25	0.04	0.17
P ₂ O ₅	0.06	0.11	0.06	0.11	0.08	0.06	0.11	0.06	0.09	0.54
Na ₂ O	0.62	1.35	0.96	3.50	0.50	4.50	8.02	2.50	4.85	10.64
K ₂ O	0.02	0.27	9.42	0.55	0.05	0.25	1.07	10.60	9.06	0.71
H ₂ O*	0.10	0.10	0.40	0.44	0.60	0.20	0.55	0.40	0.54	0.25

A) olivina, B) anortita, C) moscovita, D) bitownita, E) augita, F) labradorita, G) ortoclase, H) microclina, I) K-plagioclase, J) albita.

La composición elemental de suelos con actividad de organismos fotosintéticos se muestra en la **tabla 5**. En ella se observa que el Si se encuentra en concentraciones de 134.9 g Si kg⁻¹ a 208.1 g Si kg⁻¹. Una diferencia de 73.2 gkg⁻¹ entre el más alto y el menor, y esta parece estar relacionada con el pH de la solución del suelo. Tomando en cuenta que suelos con pH ácido no son adecuados para el desarrollo de ecosistemas productivos, y como referencia de suelos productivos a los de pH entre 7.5-8.0, podemos estimar la movilización de elementos ya sea por el desarrollo de los ecosistemas y las condiciones ambientales. La simple resta de elementos nos indica que el Si es el de mayor actividad (“pérdida”) con -71.8 g kg⁻¹, seguido por el oxígeno, potasio, magnesio y sodio con -38.4, -10.2, -2.5 y -1.6 gkg⁻¹ respectivamente. Los elementos que se sufrieron incrementos (“enriquecimiento”) son el aluminio, hierro, carbón, fósforo y calcio, con +37.7, +33.1, +9.7, +2.9 y +0.9 gkg⁻¹, respectivamente. Este comportamiento en los datos, aunque resulta

lógico y está dentro de parámetros ya establecidos, debe soportarse con mayor investigación.

Tabla 5. Composición mineral del suelo con actividad de organismos fotosintéticos y su relación con el pH de la solución acuosa (pH ~ 7.0), obtenida por suspensión durante 40 min y agitación eventual. El análisis se realizó con la técnica EDS-X. Los resultados se expresan en % de muestras secas.

ELEMENTO 4.5-5.0		pH en la solución del suelo. (1:1)							
		5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	
Silicio	Si	13.49	14.16	16.26	18.38	19.71	19.51	20.67	20.81
Oxígeno	O	54.33	55.49	57.58	56.29	58.38	60.72	58.17	59.27
Aluminio	Al	10.45	10.40	10.15	9.22	6.65	6.87	6.68	5.56
Carbón	C	9.52	11.92	8.96	8.67	9.42	7.87	8.55	10.08
Calcio	Ca	0.88	0.73	0.56	0.86	0.79	0.48	0.79	1.13
Fósforo	P	0.36	0.36	0.22	0.17	0.12	0.08	0.07	0.08
Hierro	Fe	5.34	5.05	4.23	3.99	2.16	1.80	2.03	1.05
Magnesio	Mg	0.38	0.35	0.29	0.53	0.73	0.63	0.63	0.39
Potasio	K	0.38	0.34	0.59	0.68	1.11	1.17	1.40	0.97
Titanio	Ti	0.59	0.56	0.45	0.44	0.23	0.21	0.22	0.15
Sodio	Na	0.41	0.28	0.33	0.48	0.53	0.52	0.57	0.47
Silicio/ Oxígeno	Si/O	0.25	0.26	0.28	0.33	0.34	0.32	0.36	0.35
Silicio/ Aluminio	Si/Al	1.29	1.36	1.60	1.99	2.96	2.83	3.09	3.74

EL SI EN LA PRODUCCIÓN DE LOS ORGANISMOS FOTOSINTÉTICOS

Un gran número de organismos fotosintéticos se han tratado con formas solubles de Si, principalmente H_4SiO_4 , H_3SiO_4^- , y K_2SiO_3 , aunque también se aplican fuentes de Si con baja solubilidad, Ca_2SiO_4 , esquilmos de industria del acero y materiales integrados por MPA_{Si} . Estos últimos materiales son una fuente de las múltiples formas solubles de Si, que son controladas por las demandas del ecosistema.

Las exigencias de una productividad sustentable en los ecosistemas fotosintéticos obligan a mantener una disponibilidad constante de los

elementos minerales requeridos en la nutrición, en cantidad y calidad. Estos deben ser aprovechados por todos los integrantes de la cadena trófica de la productividad primaria: microorganismos, hongos, protozoarios, algas y plantas. Ello, favoreciendo el desarrollo con el menor consumo y pérdida de energía, reduciendo al mínimo la entropía de los ecosistemas. Actualmente, un grupo de MPA_{Si} se están empleando en la productividad de organismos fotosintéticos; ellos tienen la composición que se presenta en la **tabla 6**.

Tabla 6. Composición química de MPASi empleados en la productividad sustentable de organismos fotosintéticos. Las muestras se analizaron con la técnica EDS-X. Los resultados se muestran en % de muestra seca.

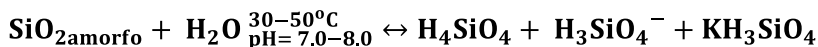
Elemento	MPA_{Si} Silimotion®			
	Normal	Plus	Ultra	Fosfo
SiO_2	21.559	29.024	51.419	32.140
CaO	49.078	42.392	22.334	33.032
MgO	12.666	10.978	5.914	4.074
Fe_2O_3	5.455	5.604	6.051	8.016
K_2O	2.322	3.158	5.666	3.046
ZnO	3.517	3.502	3.457	3.410
Al_2O_3	1.922	1.659	0.870	4.211
Na_2O	0.955	1.163	1.787	1.163
P_2O_5	0.700	0.744	0.876	8.740
SO_3	0.598	0.539	0.362	0.399
MnO	0.302	0.302	0.302	0.390
Cl	0.193	0.197	0.209	0.185
TiO_2	0.157	0.157	0.157	0.397
H_2O^+	0.100	0.100	0.100	0.100
Total	99.524	99.519	99.504	99.303
Captura de CO_2 g/100 g	10.000	25.000	45.000	35.000

Estos MPA_{Si} -Silimotion® tienen un mejor comportamiento termodinámico, cuentan con mejor solubilidad comparada con los minerales presentes en el suelo, dado su alto contenido de $\text{SiO}_{2\text{amorfo}}$ y bajo contenido

de minerales cristalinos. Además, cumplen con las reglas de solubilidad de los minerales presentes en los suelos con alta productividad de los organismos fotosintéticos, que son los siguientes:

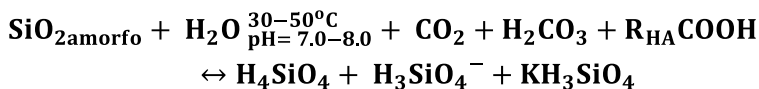


Esta reacción es dependiente del pH del agua, mejor solubilidad a pH entre 7.0-8.0 y temperaturas entre 30-50°C. El pH ligeramente alcalino promoverá la formación del ion H_3SiO_4^- , que reaccionará con los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , etc.) presentes en la solución del suelo.



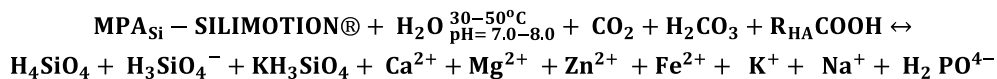
Aquí es importante que el MPA_{Si} -Silimotion® esté en contacto con el H_2O el mayor tiempo posible; por ello, en sistemas semi-hidropónicos e hidropónicos el aprovechamiento del mineral será del 100%. Lo mismo ocurrirá cuando el MPA_{Si} -Silimotion® se aplique en cultivos con acolchado de suelos, los cuales incrementan la temperatura del suelo y mantienen la humedad.

Otro requerimiento termodinámico para mejorar la solubilidad de los MPA_{Si} -Silimotion® es la presencia de CO_2 acuoso en la solución en la forma de ácido carbónico, H_2CO_3 , por lo que el mineral rico en Si es captador de $\text{CO}_{2\text{gas}}$, cuando este es atrapado en la solución del suelo. Se ha estimado que los MPA_{Si} -Silimotion® pueden capturar de 100 a 400 g $\text{CO}_{2\text{gas}} \text{kg}^{-1}$, al completar su total disolución. A esta reacción de solubilización debemos agregar que los carboxilos contenidos en sustancias húmicas ($\text{R}_{\text{HA}}-\text{COOH}$) y los del ácido cítrico mejoran la solubilización de los MPA_{Si} -Silimotion®, quedando la reacción de solubilización:



Termodinámicamente, la reacción estará a favor de la formación de especies solubles de Si, el H_4SiO_4 y los silicatos H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, por lo que la solubilización de los MPA_{Si} -Silimotion® será como se muestra

en la siguiente reacción de solubilización (algunas de las reacciones de disolución de minerales se muestran en el índice anexo):



La proporción de cada una de las especies solubles dependerá de la composición del MPA_{Si} -Silimotion[®], y la velocidad de disolución dependerá de las condiciones indicadas, mismas que son altamente compatibles con las prácticas de manejo de la producción orgánica de organismos fotosintéticos.

Para aportar $\text{CO}_{2\text{gas}}$ al suelo, existen dos procedimientos, uno mediado por la descomposición de la materia orgánica realizada por la actividad microbiana (hongos, bacterias, protozoarios), y la segunda al aplicar en el sistema de riego presurizado solución rica en $\text{CO}_{2\text{acuoso}}/\text{H}_2\text{CO}_3$. En lo particular consideramos muy adecuado mejorar el contenido de materia orgánica (MO) y el consorcio microbiano, como el que se encuentra presente en el rumen de los bovinos, o bien desarrollar un consorcio formado por bacterias y hongos con alta capacidad de degradar la celulosa y las ligninas, lo cual proveerá adicionalmente de sustancias húmicas. Se conoce que algunos microorganismos para su mejor actividad requieren de H_4SiO_4 , como las bacterias fotosintéticas y fijadoras de nitrógeno ($\text{N}_{2\text{gas}}$), las cianófitas, que abundan en suelos ricos en Si, y las micorrizas, que mejoran la solubilidad y movilidad de los minerales.

BENEFICIOS DE LOS MPA_{Si}

Beneficios del Si presente en los minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) son:

- a. El Si se encuentra en la naturaleza principalmente en forma sólida formando parte de los minerales primarios, en la forma oxidada (SiO_2), y ocupa del 70 al 90% de los componentes sólidos del suelo; siendo el segundo componente químico de los minerales primarios, no se encuentra en su forma elemental

(Si^o) en los sistemas naturales. Está presente en la solución del suelo entre 50 y 150 ppm como ácido ortosilícico [H₄SiO₄] y las formas iónicas [H₃SiO₄⁻], [H₂SiO₄²⁻], [HSiO₄³⁻] y [SiO₄⁴⁻], que forman sales solubles (silicatos) con los cationes Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, K⁺, Na⁺, etc. La presencia de cada uno es regulada por las condiciones de acidez, humedad y microbiología de los suelos.

- b. El agua es el disolvente universal, y esta propiedad se engrandece cuando está presente el Si en la forma de [H₄SiO₄] o sus silicatos. Por ello los nutrientes catiónicos son más solubles, mejor asimilados y fácilmente transportados a través de los tejidos, mejorando la nutrición en todos los tejidos de la planta. Cuando finalmente se concluye el transporte de nutrientes, el [H₄SiO₄] queda libre y se deshidrata para formar estructuras poliméricas solubles que recubren las paredes celulares, otras sólidas conocidas como fitolitos o cuerpos-Si₂nH₂O y materiales que recubren la superficie de los tricomas (pelos pubescentes). Como el Si viaja con el agua de transpiración, también apoya la distribución de agua y la turgencia celular, además de mejorar la nutrición de las hojas, las cuales son saludables y de mejor tamaño. Normalmente es fácil encontrar grandes cantidades de Si en las hojas, principalmente en la superficie de la epidermis, de 3 a 25% del peso seco. El [H₄SiO₄] cuenta con transportadores proteicos del tipo acuaporinas que se encuentran en la membrana plasmática celular y del tonoplasto, por lo que el Si se puede transportar y almacena en toda la planta.
- c. Al transportar los nutrientes, el Si estimula el desarrollo del tejido vascular xilema del tipo traqueidas, sobre todo el que se encuentra en los tallos y ramas que recubren a las células de la médula, que almacenan reservas de carbohidratos. También se estimula este tipo de tejido en el mesocarpio de las frutas para mejorar la nutrición y movilización de reservas de carbohidratos, que proporcionan calidad a la cosecha. Las células de la médula del tallo/rama almacenan gran cantidad de reservas de carbohidratos principalmente en la forma de almidón. La acumulación de reservas también es apoyada por la nutrición con Si; cada célula puede ocupar el 80% de su espacio celular con estructuras esféricas de almidón de un diámetro de 10 µm. Por otro lado, también para la movilización de reservas se apoya el desarrollo de plasmodesmos o poros que se encuentran en la pared celular. Este tipo de respuesta se observa claramente en aguacate, zarzamora, tomate, frijol, algodón, fresa, trigo y arroz, principalmente.

- d. El Si biogeoquímicamente disponible, contenido en el suelo, en los minerales primarios que lo componen, varía, según la sobreexplotación causada por la actividad de los organismos fotosintéticos y la erosión promovida por el clima (lluvia, viento, radiación solar, temperatura, cubierta vegetal y manejo del suelo). En suelos con poca explotación, se observan concentraciones de Si en la capa arable de 25 cm, 800 ton ha⁻¹, mientras que un suelo sobreexplotado muestra una concentración de 370 ton ha⁻¹. Se detecta que una concentración menor limita grandemente la productividad y sanidad de los organismos fotosintéticos y sus cosechas, evidenciando que el Si es fundamental en el desarrollo sustentable de los organismos fotosintéticos.
- e. Las moléculas de Si fisiológicamente activas son solubles, estables y asimilables e incluyen a monómeros, dímeros, polímeros y coloides del ácido ortosilícico [H₄SiO₄]. Potencializando en los organismos fotosintéticos la tolerancia y resistencia contra el estrés biótico y abiótico, al formar oligómeros con polímeros de carbohidratos, proteínas y sus iones con los cationes de calcio, magnesio, potasio, zinc, hierro. Sus formas sólidas en cuerpos-Si₂n·H₂O proporcionan una barrera física contra depredadores y condiciones extremas de clima.
- f. La epidermis, tejido que forma una barrera protectora entre el medio ambiente y las células que componen los diferentes tejidos de la planta, contiene de 10 al 50% de Si, formando cuerpos-Si₂n·H₂O sólidos y flexibles, con funciones biológicas específicas. Algunas de estas formas son los fitolitos y tricomas. Las diferentes formas de tricomas permiten desde la asimilación de nutrientes hasta la liberación de compuestos que repelen y suprimen el desarrollo de bacterias, hongos, insectos y ácaros que perjudican el desarrollo de los organismos fotosintéticos. Así también, cuando el cultivo se desarrolla adecuadamente en ambientes ricos en Si, se estimula la simbiosis con microorganismos e insectos benéficos. Además, en las células de la epidermis, el Si puede estar en forma polimérica y coloidal, lo cual permite mantener disponibles agua y minerales, mejorando la turgencia del tejido foliar. Por otro lado, los fitolitos (cuerpos-Si₂n·H₂O) permiten aprovechar mejor la luz del Sol, ya que ellos la dispersan y eliminan el efecto de la luz ultravioleta. Todo esto permite una protección física, química y biológica, que resulta en resistencia y adaptación al estrés biótico y abiótico. En organismos fotosintéticos como la soya, sorgo, papaya, aguacate, zarzamora, chile habanero, fresa, maíz, trigo, arroz, caña de azúcar, cebada y avena, los fitolitos pueden cubrir del 20 al 70% de la epidermis en el haz de la hoja,

limitando la pérdida de agua por transpiración y el efecto de las heladas, ya que los fitolitos actúan como aislantes térmicos.

- g. Adicionalmente las diferentes formas de Si soluble, por interacción química-iónica, permiten una mejor movilidad a través de los tejidos de: minerales, carbohidratos, metabolitos secundarios y proteínas; ello a través de inducir la formación de tejido vascular del tipo traqueidas y proteínas de transporte conocidas como acuaporinas. Mejorando substancialmente los procesos metabólicos involucrados en la productividad, crecimiento, producción de biomasa, etc. Con los MPA_{Si} -Silimotion® aplicados a los organismos fotosintéticos, se observa mejor desarrollo de tallo (capacidad de almacenamiento y movilización de reservas), cantidad y área foliar (mayor asimilación de energía solar y CO_2 y producción de carbohidratos), que conduce a un rápido crecimiento y mayor calidad y cantidad de cosecha.
- h. Para la mejor producción, es importante que la disponibilidad en cantidad, oportunidad y calidad de Si se proporcione desde el inicio del desarrollo del cultivo (germinación de la semilla y desarrollo de plántula). Por ello los MPA_{Si} -Silimotion® deben aplicarse en la preparación del terreno antes de la germinación, para estar disponibles desde el inicio del crecimiento e inicio de la floración, periodos en los que los organismos fotosintéticos tienen una demanda crítica de Si. Aunque las demandas de Si ocurren durante todo el ciclo de vida de los organismos fotosintéticos, los antes mencionados deben ser atendidos. Es importante destacar aquí que los cuerpos- $\text{Si}_2\text{nH}_2\text{O}$ crecen, producen y renuevan, durante todo el desarrollo vegetativo, sobre todo en tejido en madurez fisiológica. Por ello la aplicación de MPA_{Si} -Silimotion® debe ser preventiva y generosamente abundante.
- i. Los MPA_{Si} -Silimotion® estimulan el desarrollo de la flora microbiana del suelo, bacterias, hongos, algas, de tal manera que es posible incrementar la asimilación de nitrógeno (N_2), por procesos individuales de bacterias fotosintéticas y microalgas, o bien mediante la simbiosis entre plantas y bacterias, soya-*Bradyrhizobium*, frijol-*Rhizobium*, maíz-*Azospirillum* y cianófitas-microalgas. Por otro lado, también la flora microbiana puede participar en la disolución del Si y su movilización en conjunto con otros minerales. Son importantes para ello las micorrizas.
- j. El sistema radicular tiene capacidad de detectar la presencia de Si soluble, desarrollando diferentes estrategias metabólicas y fisiológicas para asimilarlo. Se observa un abundante desarrollo, tamaño y diámetro de la raíz secundaria. En ella se encuentra una gran presencia de proteínas trans-

portadoras de H_4SiO_4 . Esto aparentemente induce la producción de tejido vascular xilema del tipo traqueidas, lo cual promueve un mayor diámetro de tallos y ramas.

- k. El Si es requerido durante los primeros estadios del desarrollo de frutos, soya, sorgo, aguacate, papaya, fresa, zarzamora, jitomate, maíz, papa, algodón, manzana, durazno, chile habanero, etc., proporcionando adecuados niveles de minerales y carbohidratos. Ello permite una mejor sanidad y vida de anaquel de los frutos perecederos.

Los beneficios del MPA_{Si} -Silimotion® se han observado en los organismos fotosintéticos: fríjol, soya, trigo, arroz, cebada, avena, maíz, sorgo, algodón, caña azúcar, tomate, chile, fresa, zarzamora, papaya, aguacate, papa, zanahoria, jícama, sandía, pepino, calabacita, olleto, pradera, rosa, nochebuena y gerbera. En todos ellos se encuentran beneficios en el desarrollo sano del cultivo, y la producción de cosecha siempre ha superado al tratamiento sin MPA_{Si} -Silimotion®. En general, la superficie tratada en el ciclo 2008-09 fue del orden de las 15,000 ha y los resultados sobresalientes ocurrieron cuando los cultivos sufrieron estrés por factores ambientales, sequía, salinidad y bajas y altas temperaturas. También se observa mejor producción ante el estrés biótico. Basados en los principios termodinámicos de los MPA_{Si} -Silimotion®, es posible acelerar su disolución, para mejorar la asimilación de H_4SiO_4 por los organismos fotosintéticos y promover la productividad.

En general, para satisfacer las demandas de Si de los organismos fotosintéticos cultivados en suelo, se deben aplicar 500 kg ha⁻¹ de MPA_{Si} -Silimotion® al inicio del establecimiento, en la fuente donde los organismos obtendrán sus nutrientes. Se deben seguir las indicaciones mostradas en los párrafos anteriores, para mejorar la disolución.

En sistemas con acolchado de suelo, el MPA_{Si} -Silimotion® se debe aplicar en la fertilización de fondo, antes de instalar la película plástica; es recomendable la dosis de 1,000 kg ha⁻¹.

En cultivo de frutales como papaya y guayaba, se deben aplicar 2.0 kg planta de MPA_{Si}-Silimotion®. En árboles como el aguacate se recomiendan aplicar 15 kg por árbol en un ciclo de 12 meses.

En cultivo intensivo en semi-hidroponía o hidroponía, se recomienda aplicar por individuo 250 g de MPA_{Si} como el O4mas®.

LECTURAS RECOMENDADAS

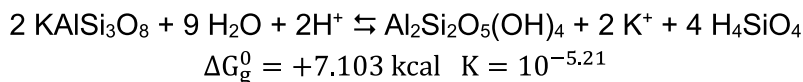
- Arnon, D.I. and Stout, P.R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.*, 14: 371-375
- N. Assayag, J. Matter, M. Ader, b, D. Goldberg and P. Agrinier; Water-rock interactions during a CO₂ injection field-test: Implications on host rock dissolution and alteration effects, *Chemical Geology*, Volume 265, Issues 1-2, 15 July 2009, Pages 227-235,
- Conley, Daniel J.: Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochem. Cycles*, 2002,16(4): 1121
- Epstein, E., Bloom, A.J., 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*, second ed. Sinauer, Sunderland, MA).
- Epstein, E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91, 11-17.
- Epstein, E., 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50, 641-664.
- Fabrice Frayssé, Oleg S. Pokrovsky, Jacques Schott and Jean-Dominique Meunier: Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology*, Volume 258, Issues 3-4, 30 January 2009, Pages 197-206.
- Gunter Faure. *Principles and applications of Inorganic Geochemistry. A comprehensive textbook for geology students* by G. Faure, 1991. Macmillan, New York, 626 pp.
- V.C. Farmer, E. Delbos and J.D. Miller: The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams. *Geoderma* Volume 127, Issues 1-2, July 2005, Pages 71-79.

- Gierlinger N, Sapei L, Paris O.: Insights into the chemical composition of *Equisetum hyemale* by high resolution Raman imaging. *Planta*. 2008 Apr; 227(5): 969-80.
- Haijun Gong, Xueyi Zhu, Kunming Chen, Suomin Wang, and Chenglie Zhang: Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science* Volume 169, Issue 2, August 2005, Pages 313-321.
- Pawan Kumar Jha, Jaya Tiwari, Umesh Kumar Singh, Manish Kumar and V. Subramanian. Chemical weathering and associated CO₂ consumption in the Godavari River basin, India; *Chemical Geology*, Volume 264, Issues 1-4, 30 June 2009, Pages 364-374,
- Latshaw, W. L. and Miller E. C.: Elemental Composition of the Corn Plant. *Jour. Agr. Research*, 27:845-859. 1924.
- Justus von Liebig, 1840, *Chemistry in its Applications to Agriculture and Physiology* (1840).
- Lixin Jin, Nives Ogrinc, Stephen K. Hamilton, Kathryn Szramek, Tjasa Kanduc and Lynn M. Walter; Inorganic carbon isotope systematics in soil profiles undergoing silicate and carbonate weathering (Southern Michigan, USA), *Chemical Geology*, Volume 264, Issues 1-4, 30 June 2009, Pages 139-153.
- Ma, J.F., Miyake, Y., Takahashi, E., 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: Datnoff, L., Snyder, G., Korndorfer, G. (Eds.), *Silicon in Agriculture*. Elsevier Science, New York, pp. 17-39.
- J. D. Meunier, F. Guntzer, S. Kirman and C. Keller, 2008. Terrestrial plant-Si and environmental changes: *Mineralogical Magazine*; Session 3: Biomineralization, February 2008; v. 72; no. 1; p. 263-267; Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.

REACCIONES DE ESTABILIDAD DE MINERALES PRIMARIOS

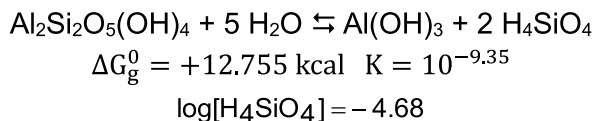
Relaciones de estabilidad entre microclina, caolinita, gibbsita, y sílice amorfo en la presencia de agua a 25°C y 1 atm de presión.

Microclina-caolinita

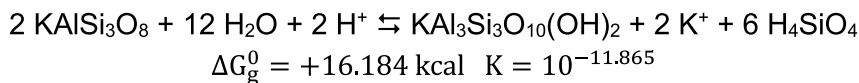


$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = -2 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] - 2.60$$

Caolinita-gibbsita

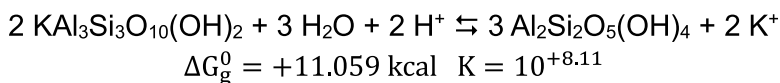


Microclina-moscovita



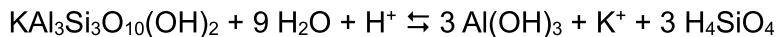
$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = -3 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] - 5.93$$

Moscovita-caolinita



$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = +4.05$$

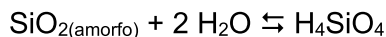
Moscovita-gibbsita



$$\Delta G_g^0 = +13.603 \text{ kcal} \quad K = 10^{+9.97}$$

$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = -3 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] - 9.97$$

Límite de solubilidad del sílice amorfo



$$\Delta G_g^0 = +3.604 \text{ kcal} \quad K = 10^{+2.64}$$

$$\log [\text{H}_4\text{SiO}_4] = -2.64$$

Relaciones de estabilidad para albita y anortita en contacto con soluciones acuosas a 25°C y 1 atm de presión:

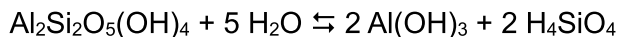
ALBITA

Albita-caolinita



$$\log \frac{[\text{Na}^+]}{[\text{H}^+]} = -2 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] - 0.19$$

Caolinita-gibbsita



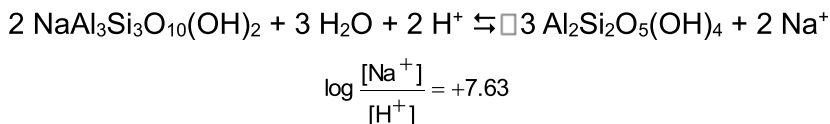
$$\log [\text{H}_4\text{SiO}_4] = -4.68$$

Albita-paragonita

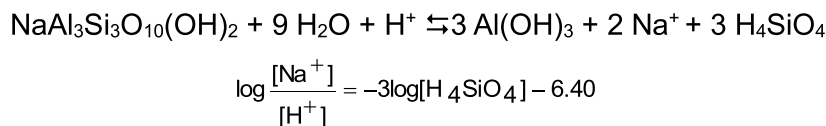


$$\log \frac{[\text{Na}^+]}{[\text{H}^+]} = -\log [\text{H}_4\text{SiO}_4] - 4.10$$

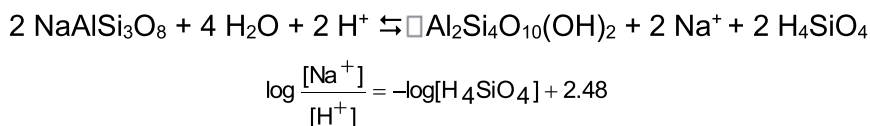
Paragonita-caolinita



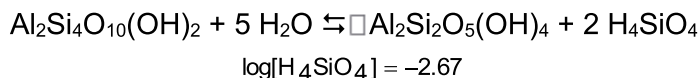
Paragonita-gibbsita



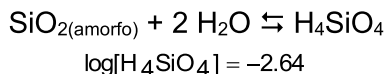
Albita-pirofilita



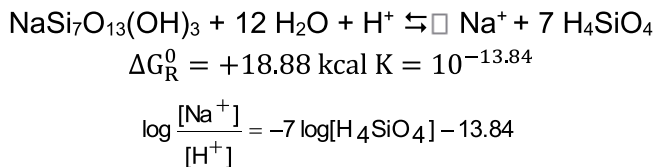
Caolinita-pirofilita



Límite de solubilidad del silicio amorfo

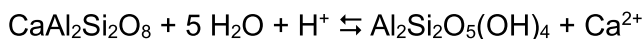


Límite de solubilidad de magadita



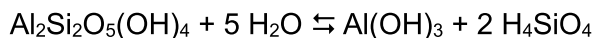
ANORTITA

Anortita-caolinita



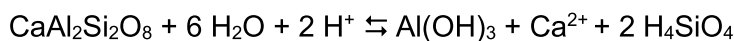
$$\log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = +16.17$$

Caolinita-gibbsita



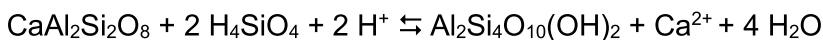
$$\log[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -4.68$$

Anortita-gibbsita



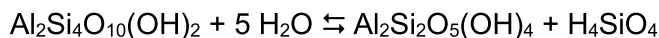
$$\log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = -2\log[\text{H}_4\text{SiO}_4] + 6.82$$

Anortita-pirofilita



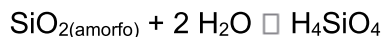
$$\log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = 2\log[\text{H}_4\text{SiO}_4] + 21.50$$

Caolinita- pirofilita



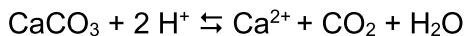
$$\log[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -2.67$$

Límite de solubilidad del silicio amorfo



$$\log[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -2.64$$

Límite de solubilidad de calcita

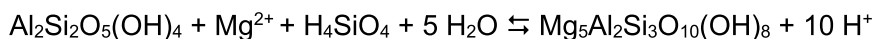


$$\log \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = 13.38 \quad \text{si } [\text{CO}_2] = 3 \times 10^{-4} \text{ atm}$$

Relaciones de estabilidad entre silicatos de magnesio (Mg) en la presencia de agua acidificada a 25 °C y 1 atm de presión.

SILICATOS AL-MG

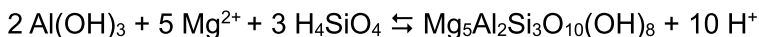
Caolinita-clorita



$$\Delta G_g^0 = +85.235 \text{ kcal} \quad K = 10^{-62.49}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -0.2 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 12.50$$

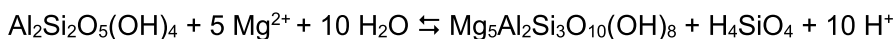
Gibbisita-clorita



$$\Delta G_g^0 = +72.48 \text{ kcal} \quad K = 10^{-53.14}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -0.6 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 10.62$$

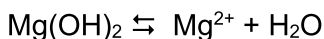
Pirofilita-clorita



$$\Delta G_g^0 = +92.51 \text{ kcal} \quad K = 10^{-67.82}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = +0.2 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 13.56$$

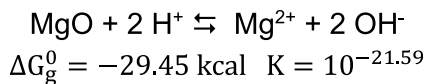
Límites de solubilidad de brucita



$$\Delta G_g^0 = +15.40 \text{ kcal} \quad K = 10^{-11.29}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = +16.71$$

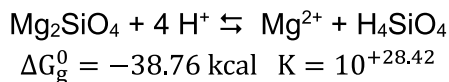
Límites de solubilidad de periclasa



$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]} = +21.59$$

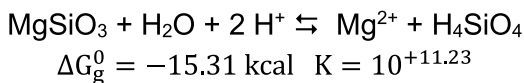
SOLUBILIDAD DE SILICATOS DE Mg

Forsterita



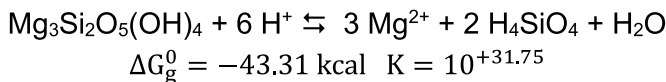
$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = +0.5 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 14.2$$

Estatita



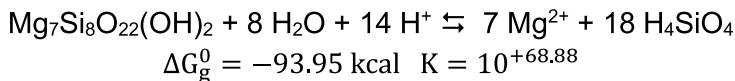
$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -\log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 11.23$$

Serpentina



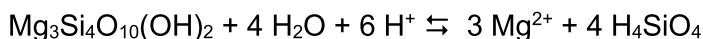
$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -0.67 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 10.58$$

Antrofilita



$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -1.14 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 9.84$$

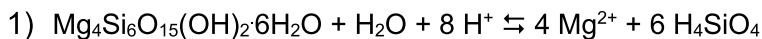
Talco



$$\Delta G_g^0 = -29.91 \text{ kcal} \quad K = 10^{+21.93}$$

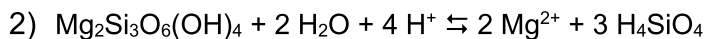
$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -2 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 10.96$$

Sepiolita



$$\Delta G_g^0 = -43.28 \text{ kcal} \quad K = 10^{+31.73}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -1.5 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 7.93$$



$$\Delta G_g^0 = -21.26 \text{ kcal} \quad K = 10^{+15.58}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = -1.5 \log [\text{H}_4\text{SiO}_4] + 7.79$$

Ecuaciones para diagrama de estabilidad de minerales en un sistema $\text{K}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-HCl-H}_2\text{O}$ a 25 °C, 1 atm de presión y en equilibrio con sílice amorfo.

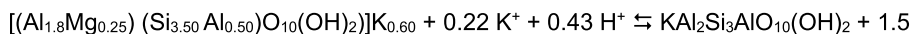
Caolinita-moscovita



$$\Delta G_g^0 = +10.959 \text{ kcal} \quad K = 10^{-8.03}$$

$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = +4.02$$

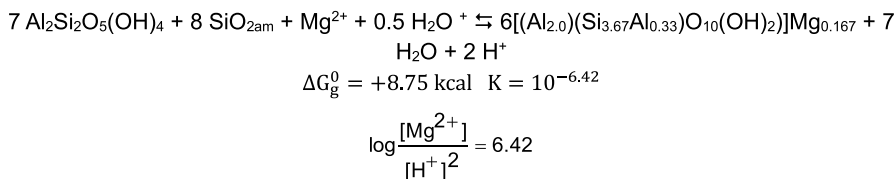
Illita-moscovita



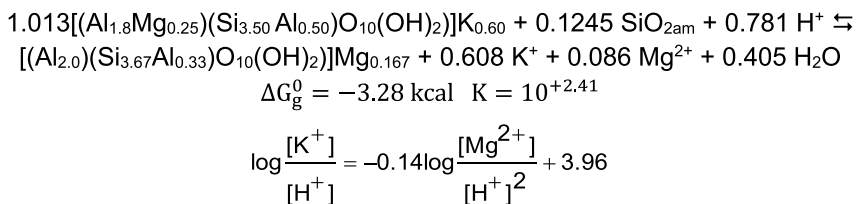
$$\Delta G_g^0 = -1.658 \text{ kcal} \quad K = 10^{+1.215}$$

$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = 1.48 \log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} - 5.52$$

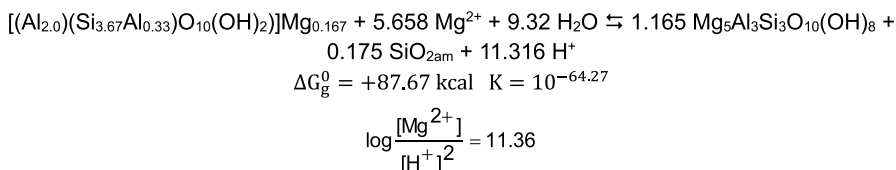
Caolinita-Mg-montmorillonita



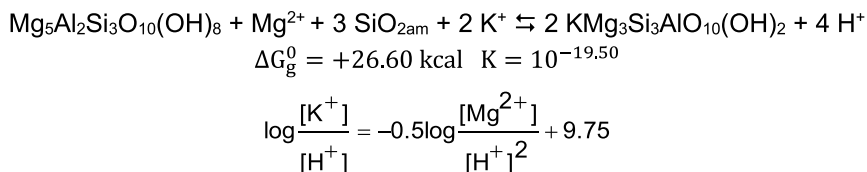
Illita-Mg-montmorillonita



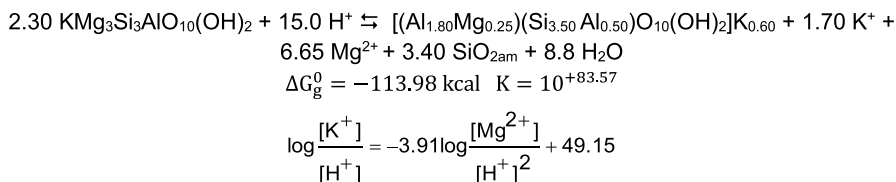
Mg-montmorillonita-clorita



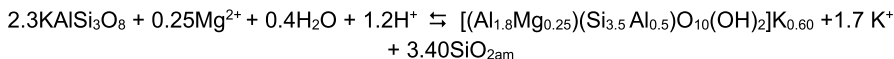
Clorita-flogopita



Flogopita-illita



Microclina-illita



$$\Delta G_g^0 = -14.67 \text{ kcal} \quad K = 10^{+10.76}$$

$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = +0.147 \log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} + 6.33$$

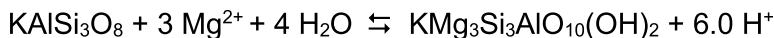
Moscovita-microclina



$$\Delta G_g^0 = +14.43 \text{ kcal} \quad K = 10^{-10.58}$$

$$\log \frac{[\text{K}^+]}{[\text{H}^+]} = +5.29$$

Microclina-flogopita

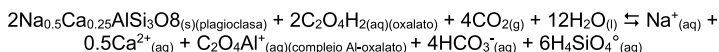
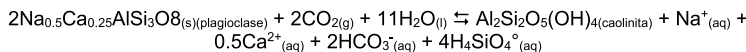
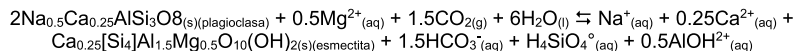
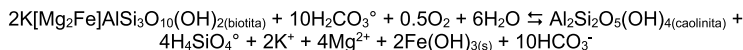
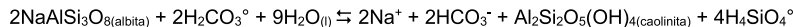
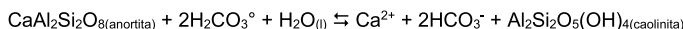
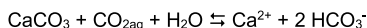
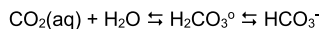


$$\Delta G_g^0 = +44.948 \text{ kcal} \quad K = 10^{-32.95}$$

$$\log \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{H}^+]^2} = 10.98$$

Los minerales del suelo y su reacción con el soluble $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{CO}_2$ y su participación en la solubilización del ácido ortosilícico.

La acción en el suelo del bióxido de carbono $\text{CO}_{2(\text{g})}$, ácido carbónico ($\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{l})}$) y agua sobre los minerales ricos en silicio y la formación de ácido silícico y coloides.



GLOSARIO SOBRE EL SILICIO:

Si: Símbolo químico para el elemento, es el término genérico empleado cuando la naturaleza del compuesto específico de silicio no es conocido.

H₄SiO₄: Ácido ortosilícico, el fundamental bloque para construcción de cuerpos sólidos de SiO₂_{amorfo}.

Peso molecular del H₄SiO₄.

#	Átomo	Masa Molar (MM) (g/mol)	Masa Subtotal (%)	Masa Subtotal (g/mol)
4	H	1.01	4.19	4.03
1	Si	28.09	29.22	28.09
4	O	16.00	66.59	64.00
Total Peso Molecular: g mol ⁻¹				96.11

SiO₂-nH₂O o SiO_{2-x}(OH)_{2x}·2H₂O: Material amorfo, hidratado, polimerizado, que compone a los cuerpos sólidos de silicio de origen biológico. Sílice colorimétrico sílice o disuelto, H₄SiO₄, que reacciona con molibdato de amonio dentro de dos minutos después de que las soluciones son mezcladas.

Oligomerización: la formación de dímeros y pequeños oligómeros de ácido ortosilícico por la remoción de agua. Por ejemplo, $2\text{H}_4\text{SiO}_4 \leftrightarrow (\text{OH})_3\text{Si-O-Si}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Polimerización: La mutua condensación de ácido ortosilícico, que proporciona coherentes unidades que incrementan de tamaño.

Compuesto organosilicon: Puede contener silicio covalentemente unido a carbón dentro de una distinta especie química.

Silano: Un compuesto que tiene átomos de silicio y grupos químicos orgánicos con frecuencia unidos a través de uniones oxígeno; *e.g.* tetratoxi o tetrametoxisilano (geles $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$).

Silanol: Grupo hidroxilo unido al átomo de silicio, Si-OH .

Silicato: Un ion químico específico que tiene una carga negativa (*e.g.* H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, SiO_3^{2-}), término también empleado para describir sales de silicio (*e.g.* metasilicato de potasio K_2SiO_3).

Sílice cristalino: Especies de sílice con estructura cristalina, a) macrocristalina (cuarzo, tridimita, y cristobalita), b) criptocristalina: consiste de cristalitas fibrosos con poros submicroscópicos (el término general es calcedonia).

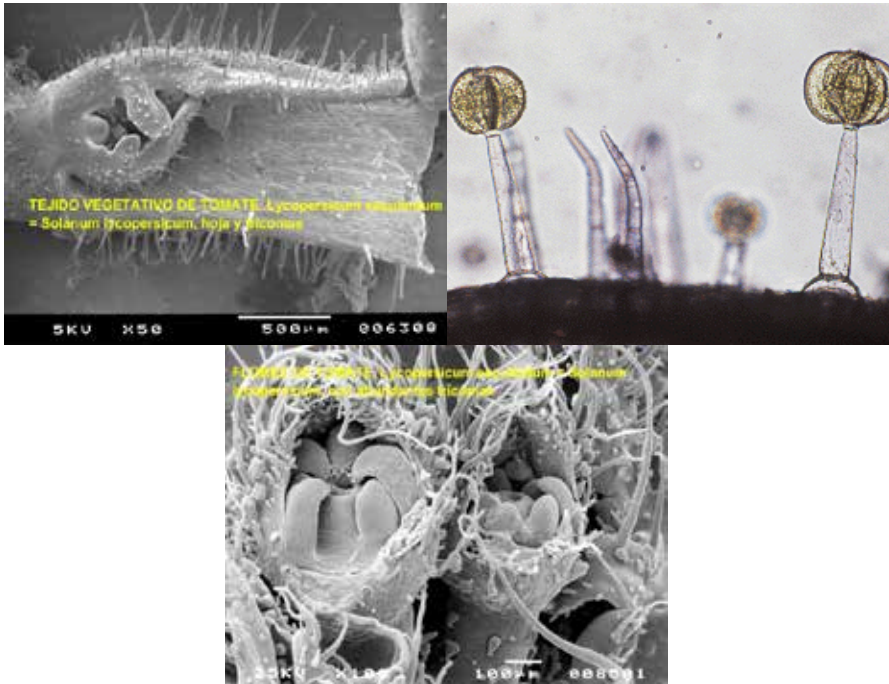
Sílice amorfo: Formas de sílice que carecen de estructura cristalina, a) **Sílica gel**, sílice amorfo duro que contiene 20 a 30% de agua, preparado comercialmente como reactivo químico o como un desecante, b) **Sílice gelatinoso**, aparece como masa gelatinosa o como un gel continuo, formado por evaporación de solución de sílice, o por acidificación una solución muy concentrada de un silicato alcalino, c) **Sílice coloidal** o sílice sol, sílice disperso en agua en partículas de dimensiones coloidales (10^{-3} a 10^{-6} mm), d) **Ópalo**, término empleado para describir al SiO_2 amorfo (estructura desordenada) de origen biológico que producen principalmente los organismos fotosintéticos (fitolitos en plantas, frústulas en diatomeas), o bien geológico, e) **Vidrio sílice**, preparado por rápido enfriamiento de un sílice fundido.

FERTILIZACIÓN LUMÍNICA Y CARBÓNICA EN INVERNADEROS

En la epidermis de las hojas de tomate se desarrolla un tipo especial de células, llamadas tricomas (pelos), que pueden ser lineales y absorbentes. Pueden ser además unicelulares y pluricelulares, fibrosos o jugosos, largos o cortos, abundantes o escasos, glandulares, urticantes. Esta diversidad le confiere importantes respuestas fisiológicas, como la de reducir la transpiración, mejorar la dispersión de la luz y su mejor asimilación y respuesta del fitocromo, reducir el daño por exceso, atraer o repeler el ataque de insectos y microorganismos, mediante la liberación de un complejo de compuestos volátiles orgánicos, principalmente terpenos.

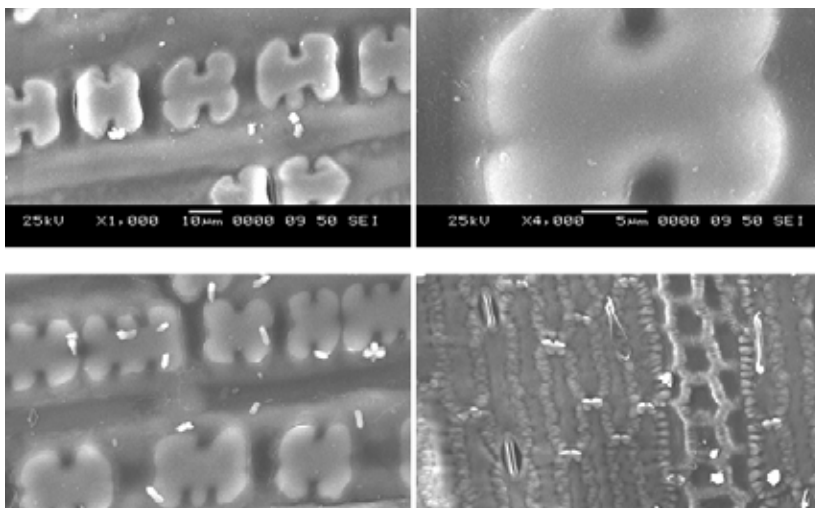
La densidad de estos tricomas o pelos en la epidermis de las hojas es afectada por la disponibilidad del nutriente mineral silicio (Si), el radio de temperatura diurna/nocturna y el fotoperiodo. Ocurre una mejor densidad de 1,200 tricomas cm^{-2} a una temperatura de 25°C día/20°C noche y una cantidad de 16-18 horas de iluminación; condiciones mayores o menores reducen la densidad en un 30 a 50%. Es importante mencionar que la epidermis de tallos, flores y frutos también tiene tricomas y es posible que estos controlen la transpiración a través de crear una capa de células altamente humectada. En la **figura 1** se muestra la estructura típica de tricomas presentes en hoja y flores:

Figura 1.



Otro tipo de estructuras que apoyan la resistencia al estrés ambiental son los fitolitos, estructuras sólidas ricas en silicio en la forma de cuarzo (SiO_2), las cuales pueden cubrir el 50-60% de la epidermis, reduciendo la pérdida de agua por transpiración, limitando el ataque de insectos y mejorando la asimilación de luz. En la fotografía siguiente se muestran fitolitos que se producen en la hoja de maíz.

Figura 2.



También en la epidermis de las hojas ocurre otro tipo de células, los estomas, con la función vital del intercambio gaseoso con el medio ambiente. En las hojas de tomate es posible encontrar 12 estomas mm^{-2} y 130 estomas mm^{-2} en el haz y el envés, respectivamente, y tienen un tamaño de $13 \times 6 \text{ mm}$, permitiendo una respuesta fisiológica caracterizada por una transpiración de $4.60 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($83 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y una asimilación de CO_2 de $16.70 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($736 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), para una eficiencia del uso del agua de $3.73 \text{ mmol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ y una producción de 16.9 kg m^{-2} .

La actividad y densidad de los estomas también son afectadas por la disponibilidad, en cantidad, oportunidad y calidad de luz solar, agua, nutrientes minerales, potasio (K) y silicio, y bióxido de carbono (CO_2). Normalmente, cuando se aportan atmósferas enriquecidas con CO_2 (1,000 ppm) a la canopia del cultivo de tomate, la densidad de estomas se reduce en un 15% y la transpiración en un 25%, y la eficiencia en el uso del agua se incrementa en 30% ($\text{CO}_2 \text{ kg/H}_2\text{O kg}$), mientras que la

actividad fotosintética o asimilación de CO_2 se incrementa de 1.8 a 3.2 g $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}$ de hoja h^{-1} , en condiciones de máxima radiación solar.

A manera de resumen, se muestra en las dos gráficas siguientes la respuesta fisiológica de la hoja a la radiación solar y al enriquecimiento atmosférico con CO_2 . Aquí también es importante resaltar que el número de cloroplastos por célula fotosintética varía de 10 a más de 50, esto dependiendo de la nutrición mineral, básicamente de microelementos.

Figura 3.

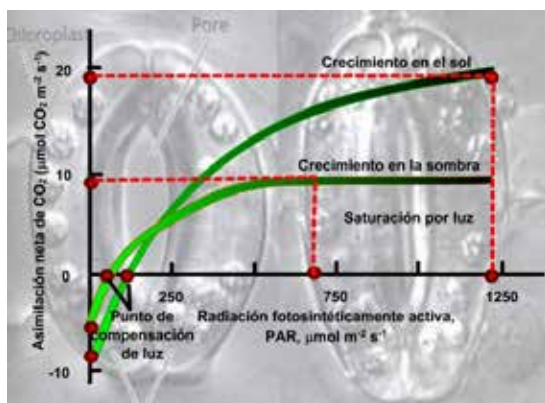
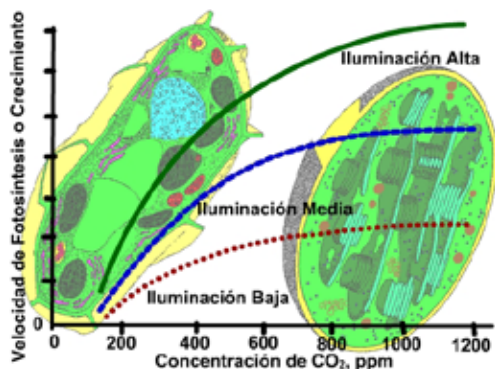


Figura 4.



LA FERTILIZACIÓN LUMÍNICA Y CARBÓNICA

Tomando como base los antecedentes arriba mencionados, se propone la fertilización lumínica y carbónica como herramienta para mejorar la producción de cosechas en volumen y calidad sanitaria y alimenticia. Las técnicas que se proponen permiten dar valor agregado a los materiales empleados en el cultivo de hortalizas bajo invernadero. Las propuestas tienen como base la amplia respuesta fisiológica y productiva de la planta de tomate (*Lycopersicum esculentum*). Baste mostrar que es posible producir desde 100 a 700 ton/ha de tomate en condiciones de cultivo bajo invernadero, aunque experiencias exitosas, realizadas en Japón muestran que es posible lograr cosechas de 1,000 ton/ha. La mejor producción se logra cuando es posible estimular las respuestas fisiológicas de la planta, fotosíntesis, transpiración, movilización rápida de fotosintétatos (azúcares) y minerales, flujo continuo de agua de la raíz a los tejidos aéreos, aunque muchas de ellas no se conocen bien.

En la **tabla 1** se ilustra la producción obtenida bajo diferentes condiciones de cultivo y país. En México, la producción en cultivo tradicional a cielo abierto en promedio es de 28 ton/ha, mientras que, cuando se aplican el riego por goteo y acolchado de suelos con películas plásticas, el promedio es de 55 ton/ha, y en invernadero con manejo hidropónico la producción está por debajo de las 200 ton/ha. La producción reportada para el cultivo en invernadero en Estados Unidos, Canadá y Holanda supera en más del doble esta producción. Esto indica una gran demanda de tecnología específica para las condiciones climáticas actuales en las más de 1,500 has cultivadas actualmente en todo el país.

Tabla 1.

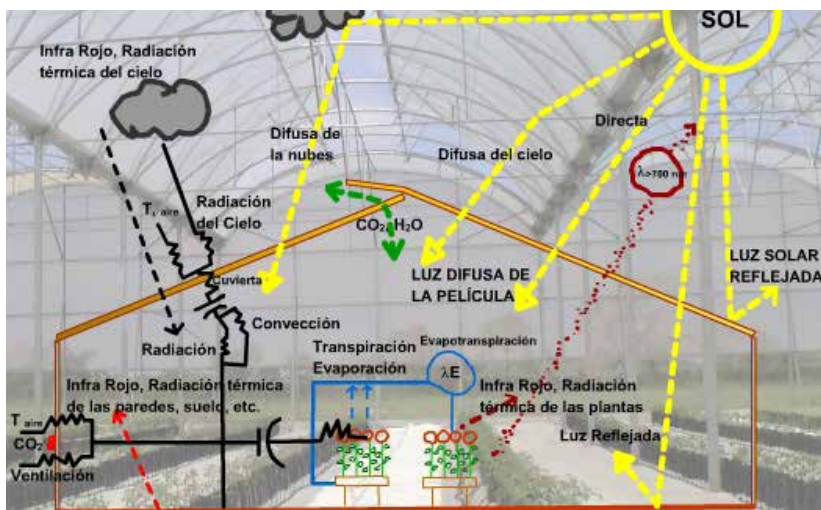
IMPACTO DE LA TECNOLOGÍA DEL CULTIVO PROTEGIDO EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (<i>Lycopersicum esculentum</i> = <i>Solanum lycopersicum</i>)						
TECNOLOGÍA	VARIABLE	UNIDAD	MÉXICO	USA	CANADÁ	NORTE AMÉRICA
	Producción	Ton	148,300	159,664	220,114	528,078
	Superficie	Hectáreas	950	330	446	1,726
Rendimiento promedio Ton/Ha			156	484	494	378
	Producción	Ton	1,804,000	1,594,241	26,882	3,425,123
	Superficie	Hectáreas	63,300	50,304	1,813	115,417
	Rendimiento promedio	Ton/Ha	28	32	15	25
INCREMENTO	Veces		6	15	33	15
	Rendimiento promedio Ton/ha 1,000					EFFECTIVA TÉCNICA: N, P, K, Ca, CO2, Si, LUZ SOLAR BHV

Los invernaderos se han construido con diferentes formas, destacando los semicirculares con ventilación cenital fija y abatible y lateral. Por otro lado, los materiales aplicados en las estructuras son de madera, bambú y tubular-metálico.

Por otro lado, también los materiales aplicados en la cubierta son diversos: películas plásticas de polietileno con y sin aditivos térmicos y difusores de luz. En el diseño del invernadero, para su mejor aporte tecnológico, no se aplican variables medibles como el flujo en cantidad

y calidad de radiación solar, flujo de masa de aire (déficit de presión de vapor, recambio de CO_2) y energía (intercambio de calor por conducción y convección, radiación solar directa, difusa), las cuales tienen un efecto directo y son fundamentales para el desarrollo de los cultivos. También deben medirse las respuestas fisiológicas del cultivo, como las arriba descritas. Aunque se debe reconocer que, pese a esto, se tienen ejemplos de éxito. En la **figura 5** se muestra un ejemplo del balance de energía que debe considerarse en el diseño de la tecnología de invernadero para la producción de hortalizas.

Figura 5.



FERTILIZACIÓN LUMÍNICA

Aquí ahora destacamos la fertilización lumínica, donde es importante aportar cantidad y calidad de radiación solar, en especial la radiación del espectro visible de longitud de onda (λ) entre 400 y 700 nm, donde ocurre la mejor respuesta fisiológica de las hojas para la asimilación de CO_2 , por lo que se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés). De esta radiación en un día claro sin

nubes, al medio día es posible recibir $2,000 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y se ha demostrado que fisiológicamente los cultivos como tomate y pepino se saturan a una radiación PAR por arriba de $1,000 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, por lo que de la radiación solar PAR máxima se aprovecha el 50-60%. Algunos cultivos como la lechuga se saturan a más de $350 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, por lo que se pueden cultivar con sólo aplicar radiación artificial.

Esto permite considerar, de manera general, que los materiales empleados en la cubierta de invernaderos no deben ser totalmente transparentes a PAR. Por ello en las películas de polietileno se adicionan aditivos sólidos, en tamaño nanométrico, para generar alta dispersión de luz y “sombra” de 10 a 25%. Algunos de estos materiales son el óxido de titanio (películas blancas) y minerales especiales de silicio o cuarzo (alta dispersión de luz, impermeabilidad térmica). También ya se desarrollan películas con permeabilidad selectiva a la radiación infrarroja caliente, fotocromáticas y las que pueden además transformar la energía solar en energía eléctrica.

La radiación PAR está compuesta por fotones con diferente longitud de onda (λ), el color azul integrado por fotones con λ de 425 a 490 nm, con una energía promedio de 260 kJ mol^{-1} , el rojo con fotones de 640 a 740 nm de λ y una energía promedio de 176 kJ mol^{-1} . Estas longitudes de onda inducen respuestas fisiológicas específicas. La luz azul induce la producción y actividad de la clorofila empleada para la captura de fotones de luz, induce la actividad y metabolismo celular, provee energía para la movilidad de los estomas y facilita el flujo de luz en la planta. Por otro lado, la luz roja estimula la producción de azúcares a partir de $\text{CO}_{2\text{gas}}$, induce la producción de cloroplastos, activa al fitocromo y propicia el crecimiento generativo (flor y cosecha).

A modo de ejemplo, las **figuras 6 y 7** muestran la respuesta a PAR de películas plásticas producidas por la empresa Sumiplast S.A. de C.V. Estas películas son la Térmica Difusa (TD), diseñada para climas fríos, ya que cuenta con alta impermeabilidad térmica y reduce la entrada y salida de radiación infrarroja caliente, y la Antitérmica Difusa (ATD)

para climas cálidos donde ocurre una alta intensidad de radiación solar y alta temperatura.

Una propiedad destacable de la película ATD es la permeabilidad selectiva de radiación del infrarrojo cercano, de 1,500 a 2,500 nm de λ , la cual permite que el calor del suelo, planta y materiales se libere al exterior para que la temperatura del invernadero no se incremente; por otro lado, ya que en el clima cálido se tiene buena radiación solar de longitud de onda de 400 nm del color azul, la película ATD la transforma en radiación de 630-700 nm activando el fitocromo activo (Pfr), induciendo la productividad de los cultivos. Así también la película, dada la mayor concentración de cuarzo manométrico (activo) en su formulación, tiene alta difusión de luz y una sombra PAR del 24%, con respecto a una película de PE-natural, sin aditivos (ver la **tabla 2**).

Figura 6

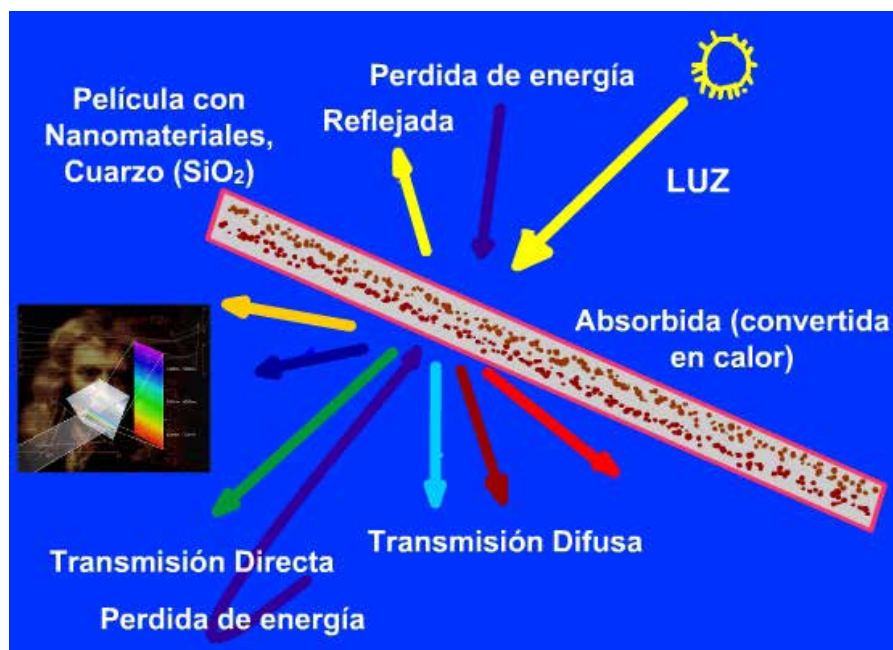


Figura 7.

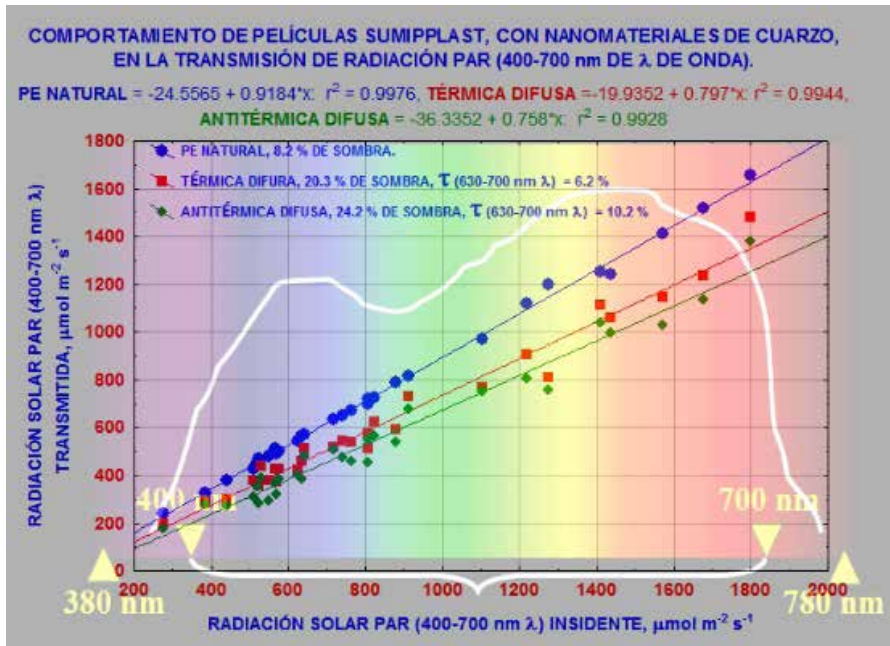


Tabla 2. Comportamiento de películas para cubierta de invernadero, Sumiplast.

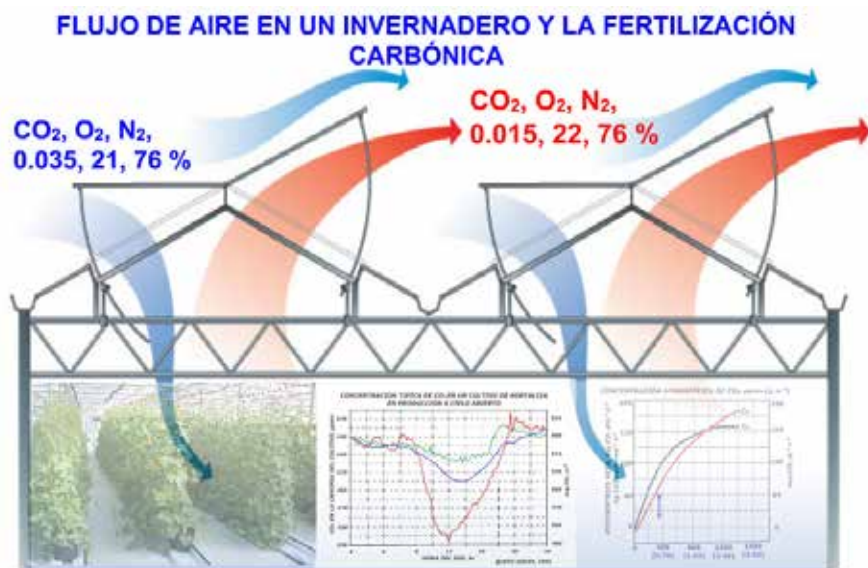
Película	Sombra, % PAR	Activación de Fitocromo, %
PE-natural	8.2	0.0
TD	20.3	6.2
ATD	24.2	10.2

FERTILIZACIÓN CARBÓNICA

Para la fertilización carbónica en invernaderos existen diferentes técnicas. La pasiva emplea sistemas de ventilación cenital y lateral, propios de la estructura del invernadero, para el recambio de aire con el exterior; su limitante es que únicamente aporta las concentraciones del ambiente, 300-400 ppm, mismas que durante la mayor actividad

fotosintética no tienen la capacidad de mantener las concentraciones óptimas mínimas que demanda el cultivo.

Figura 8.



Otras técnicas emplean el proceso de combustión de: gas LP, petróleo, diesel o combustóleo. Son adecuadas cuando los climas son templados o fríos, ya que, además del CO_2 , generan calor para calentar el aire y/o agua que se usan para mantener la temperatura de la canopia del cultivo. Su mayor limitante, que se superan cada vez más con tecnologías donde se aporta aire rico en oxígeno (O_2) para mejorar la combustión y limitar la producción de gases CO y NO_x , tóxicos para la planta. Una limitante para el aire caliente rico en CO_2 es su requerimiento de impulso para mantener un flujo constante y distribución homogénea de gas en la canopia del cultivo, lo cual implica el empleo de sistemas de ventilación eléctricos.

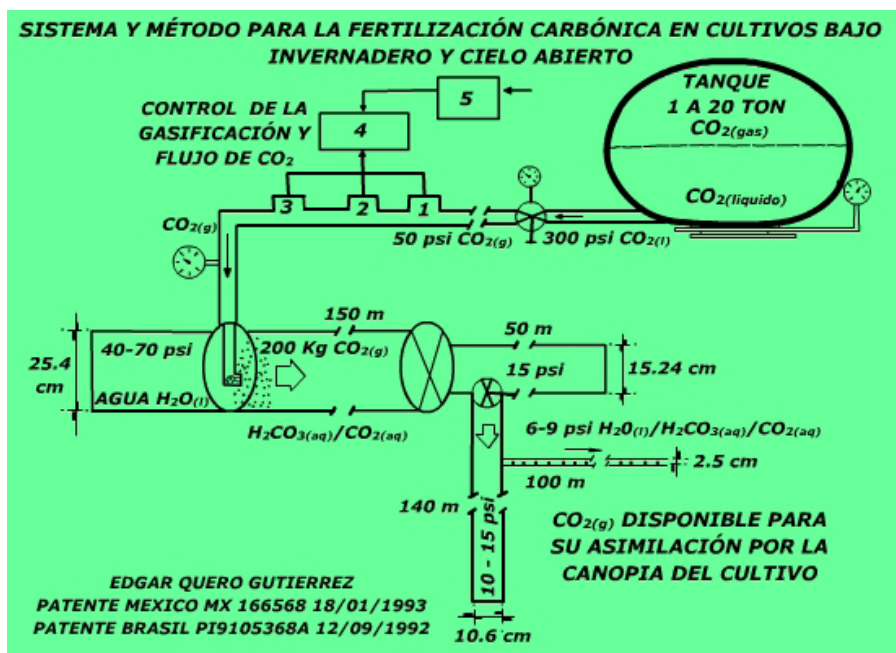
Figura 9.



Otra técnica es el empleo de $\text{CO}_{2\text{gas}}$ antropogénico, proveniente de procesos industriales de combustión, el cual es purificado (99.9%), concentrado y licuado, para su almacenamiento y/o transporte en pipas. Este gas líquido se mantiene en tanques especiales de 0.15 a 25 toneladas con requerimientos mínimos de refrigeración. Las técnicas se muestran gráficamente en las **figuras 10 y 11**.

La fertilización carbónica con $\text{CO}_{2\text{gas}}$ líquido antropogénico se puede aplicar a todos los cultivos y tipos de invernaderos, con o sin ventilación cenital, en clima cálido, templado o frío. Se puede aplicar directo o mezclado con el agua de riego, a través sistemas de riego con flujo de agua regulado, como las cintas con goteros compensados o el riego de microaspersión (como se muestra en la **figura 10**).

Figura 10.

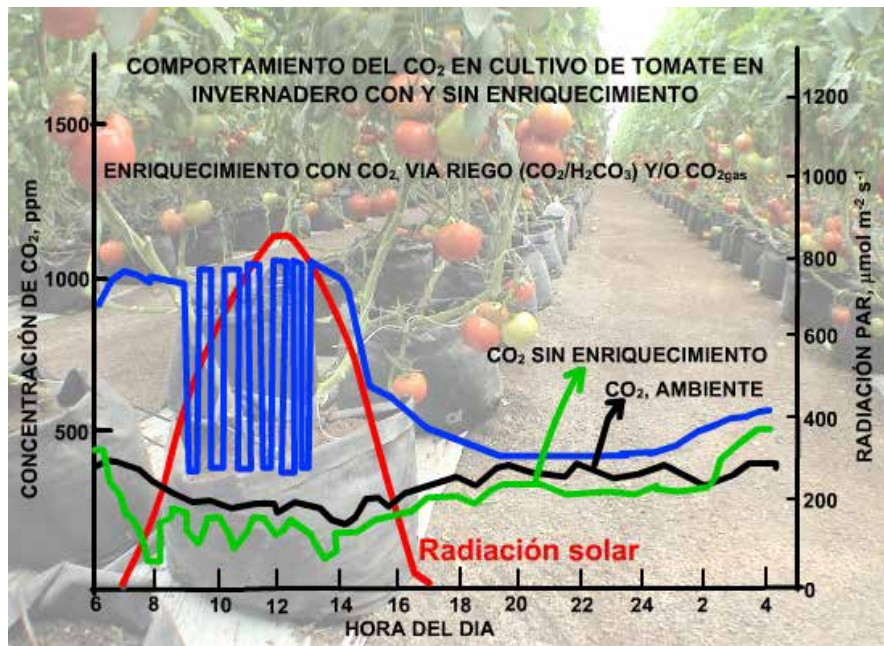


La distribución, concentración y flujo de CO₂ en el invernadero se puede regular y automatizar de forma eficiente. La concentración de CO₂ se puede mantener constantemente a una concentración de 800 ppm, aunque las experiencias indican que es mejor la aplicación de pulsos para mantener un gradiente de concentración entre 500 y 1,000 ppm (como se muestra en la **figura 11**). Esta práctica permite un mejor vaciado y llenado de floema, acorde con el flujo de nutrientes minerales, presentes en una solución nutritiva de 2.0-2.5 dS m⁻¹. Mayores concentraciones no mejoran la asimilación fotosintética de CO₂, aunque pueden causar mejoras en la calidad de cosecha.

En la práctica, el CO_{2(gas)} mezclado con agua de riego se aplica a intervalos de 45 a 60 minutos a partir de las 9 am, cuando la concentración del CO₂ del ambiente llega a 400 ppm. Es importante monitorear constantemente la concentración de CO₂ en la canopia del cultivo para

aprovechar el flujo de CO_2 proveniente del intercambio de gases causado por la ventilación cenital y lateral.

Figura 11.



El CO_2 , cuando se mezcla eficientemente a presiones mayores a 15 libras con el agua de riego, presenta fenómenos químicos importantes. El primero es la formación de ácido carbónico según la reacción siguiente: $\text{CO}_{2\text{gas}} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$. El ácido carbónico a un pH entre 6.0 y 7.0 forma especies químicas HCO_3^- (ion bicarbonato) que solubilizan a los minerales catiónicos contenidos en la solución nutritiva, mejorando la disponibilidad para la asimilación por las raíces. Ante excesos de la mezcla $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{CO}_2$, los carbonatos contenidos en el agua de riego se solubilizan para proporcionar cationes y $\text{CO}_{2\text{gas}}$ que es liberado a la atmósfera de la canopia del cultivo. En esta condición, el $\text{CO}_{2\text{gas}}$ mezclado con el agua de riego no forma carbonatos.

Las especies H_2CO_3 y HCO_3^- son estables mientras son transportadas a través del sistema de riego, y se descomponen cuando el agua enriquecida llega al sustrato y sistema radicular formando nuevamente $\text{CO}_{2\text{gas}}$, el cual fluye por gradiente de concentración a la canopia del cultivo.

Otra reacción importante de considerar es que el ácido carbónico solubiliza a los minerales ricos en silicio, por lo que favorece la asimilación por las plantas, mejorando adicionalmente los mecanismos de protección y productividad de los cultivos.

A manera de resumen, en la **tabla 3** se presentan los aportes de radiación solar y consumo de CO_2 en cultivo de tomate bajo invernadero.

Tabla 3. Aportes de radiación solar a un cultivo típico de tomate bajo invernadero hidropónico con atmósfera enriquecida con $\text{CO}_{2\text{gas}}$ a través del agua de riego.

Mes	Radiación PAR mol d^{-1}	Consumo de CO_2 kg ha d^{-1}	Inyección de CO_2 hr d^{-1}	Consumo Mínimo kg ha^{-1}	Consumo Máximo kg ha^{-1}
Enero	6	40	82	3,690	7,380
Febrero	12	60	100	4,500	9,000
Marzo	16	80	127	5,715	11,430
Abril	20	90	168	7,560	15,120
Mayo	24	100	234	10,530	21,060
Junio	24	100	253	11,385	22,770
Julio	26	120	283	12,735	25,470
Agosto	22	90	252	11,340	22,680
Septiembre	16	60	187	8,415	16,830
Octubre	12	40	157	7,065	14,130
Noviembre	6	10	89	4,005	8,010
Diciembre	6	10	67.1	3,019	6,039
				89,959	179,919

LA BIOSILICIFICACIÓN, PROCESO BIOLÓGICO FUNDAMENTAL EN LA PRODUCTIVIDAD VEGETAL

LA BIOSILICIFICACIÓN EN SISTEMAS ACUÁTICOS

El elemento silicio (Si) es un metaloide que tiene ambas propiedades metálicas y no metálicas, y es raramente encontrado en la forma pura en la naturaleza debido a su afinidad con el oxígeno [O₂]. El Si forma parte del 27% del peso de la corteza terrestre. La forma soluble hidratada del silicio es llamada ácido ortosilícico [H₄SiO₄]; la forma ionizada de este son los silicatos [*e.g.*, H₃SiO₄⁻], y bajo apropiadas condiciones, los sistemas biológicos son capaces de biosintetizar formas sólidas amorfas de Si llamado sílice [SiO₂, ó SiOn(OH)4-2*n*, *n* = 2-4]. El SiO₂ amorfo se define como un polímero inorgánico no estequiométrico, formado por una mezcla de unidades de SiO₂ y H₂O, teniendo como sustrato al H₄SiO₄. A este proceso biológico se le denomina biosilicificación.

El fitoplancton compuesto por microalgas, principalmente diatomeas, células eucarióticas unicelulares, es responsable del 25% de la productividad primaria mundial y 60% la productividad de los ecosistemas acuáticos de ríos, lagos y océanos y de una productividad no estimada en las superficies cultivadas. Las diatomeas secuestran, mediante la

fotosíntesis, el 30% del bióxido de carbono [CO_2] liberado a la atmósfera por los procesos de combustión, y generan el 40% de las 45-50 GT (GT= gigatoneladas = 1 billón e toneladas) de carbón orgánico producido en el océano. Al mismo tiempo, son responsables de la producción del oxígeno disuelto [$\text{O}_{2\text{dis}}$] en el agua, de 3 a 12 g m^{-3} , empleado para la respiración de organismos acuáticos, y parte es liberado a la atmósfera. Se ha estimado que 4.8 gramos de O_2 se producen por cada 4.66 gramos de CO_2 fijado por las diatomeas. La densidad de diatomeas puede ser mayor a un millón de células por mililitro y comúnmente encontramos esa misma cantidad en un litro.

En las diatomeas el metabolismo del Si está inextricablemente unido a la regulación del crecimiento, división celular, productividad y críticamente a la formación de nuevas frústulas, en las células hijas. Siendo los organismos involucrados predominantemente (en una escala global) en la biosilicificación –el proceso biológico de convertir el H_4SiO_4 soluble en una fase mineral $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ –. Las diatomeas emplean SiO_2 como un material estructural en su pared celular, también llamada frústula, y pueden formar una increíble variedad de estructuras de $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, con intrincadas características a una escala nanométrica (**figura 1**). Por ello, principalmente, la investigación del proceso de biosilicificación se ha centrado en estos organismos. Estableciendo que el Si es transportado a la célula de la diatomea vía proteínas específicas transportadoras, y recientes trabajos tienen determinado que la regulación de la expresión de genes es dependiente de la presencia de Si. Las diatomeas pueden producir y acumular de 0.03 a 6.5 g de SiO_2 en una densidad de un millón de células, comúnmente encontradas en un litro de agua, y se estima que en los océanos se procesan anualmente 6.7 GT de Si.

La aplicación de minerales primarios amorfos ricos en Si (MPA_{Si}) en sistemas acuáticos, como es la acuicultura del camarón en reservorios con agua de mar en la región acuícola de Sinaloa, ha mostrado que el Si, está ligado a la producción de biomasa de plancton (principalmente fitoplancton), el alimento natural del camarón. Observándose un

impacto positivo en el crecimiento, desarrollo y calidad que permite superiores cosechas (**figura 2**).

BIOSILICIFICACIÓN EN LAS PLANTAS

Análisis de tejidos de una amplia variedad de plantas mostraron que la concentración de Si varía en un rango de 1 a 100 g Si kg⁻¹ de peso seco, dependiendo de la especie de planta (**figura 3**). Comparaciones de estos valores con otros elementos, tales como fósforo, nitrógeno, calcio y otros, muestran que el Si está presente en cantidades equivalentes a estos macronutrientes.

Las plantas absorben Si de la solución del suelo en la forma de ácido ortosilícico [H₄SiO₄]. Grandes cantidades de Si son adsorbidas por el cultivo de caña de azúcar (300-700 kg de Si ha⁻¹), arroz (150-300 kg de Si ha⁻¹), trigo (50-150 kg de Si ha⁻¹), frijol (100-200 kg de Si ha⁻¹) y maíz (200-350 kg de Si ha⁻¹), ocurriendo una alta producción y acumulación de SiO₂ en la epidermis de las hojas. En promedio las plantas absorben por ciclo de cultivo de 50 a 200 kg de Si ha⁻¹. Tales valores de Si absorbido no pueden ser completamente explicados por la absorción pasiva (tal como la difusión o flujo de masa) porque en la capa del suelo de 20 cm se encuentran en promedio de 0.1 a 1.6 kg H₄SiO₄ ha⁻¹. Algunos resultados han mostrado que las raíces de arroz poseen la capacidad específica de concentrar Si en la solución externa.

FORMAS DE SILICIO EN PLANTAS

Básicamente, el silicio es absorbido por las plantas como H₄SiO₄ y sus iones silicatos [H₃SiO₄⁻]. En las plantas, el Si es transportado de la raíz a los tallos, hojas y frutos por medio del torrente de agua de transpiración en el xilema. El H₄SiO₄ soluble puede penetrar las membranas celulares pasivamente. El transporte activo de H₄SiO₄ en plantas ha recibido poco estudio.

Después de la adsorción por la raíz, el H_4SiO_4 es translocado rápidamente a las hojas de la planta en el torrente de agua de transpiración. Con el incremento de la concentración de H_4SiO_4 en la savia de la planta, este por condensación forma polímeros y con una gradual deshidratación forma SiO_2 amorfo u ópalo biogénico, generalmente con algún grado de hidratación. En la siguiente reacción se ilustra el metabolismo de la biosilificación: $n(\text{Si}(\text{OH})_4) \gg (\text{SiO}_2) + 2n(\text{H}_2\text{O})$.

Las formas poliméricas y amorfas del Si se alojan en el tejido de la epidermis creando una capa fina de membrana silicio-celulosa (Si-C) que está asociada con pectina y iones calcio; además, se forma otra capa sólida que corresponde a partículas con formas diversas pero definidas de SiO_2 , que se conocen como fitolitos, las cuales se intercalan con la película de celulosa en la cutícula, por otra parte el SiO_2 recubre las paredes externas de las células que componen a los tricomas. Los tricomas, o pelos pubescentes, son apéndices epidérmicos con diversa forma, estructura y función. Estos pueden estar en cualquier órgano de la planta, las células pueden permanecer vivas o perder su protoplasto, pueden ocurrir varios tipos de tricomas en la misma planta. Por este proceso de biosilificación, que ocurre en la epidermis: la doble capa cuticular y el recubrimiento de los tricomas, las plantas se pueden proteger; se proporciona fortaleza mecánica a las estructuras de las plantas, protegiéndolas de factores bióticos y abióticos (**figuras 4 y 5**). Algunos tricomas pueden biosintetizar compuestos químicos que repelen o dañan a plagas de insectos o bien pueden atraer a insectos benéficos. Cambios en la nutrición con Si tienen influencia en la cantidad y formas de fitolitos y tricomas.

LOS FITOLITOS Y TRICOMAS

Las plantas pueden biosintetizar estructuras ricas en Si de dimensión nanométrica (molecular), microscópica (ultraestructural) y macroscópica (masiva). El 90% del Si absorbido es transformado en estructuras silicio-celulosa y varios tipos de fitolitos, estos últimos compuestos

principalmente por SiO_2 amorfo y variable cantidad de sólido, calcio, hierro, zinc y potasio. Pudiéndoles conferir propiedades diferentes a los fitolitos, tales como porosidad, dureza, difusión y reflexión de luz solar.

Particularmente en el maíz, se ha estimado una asimilación de 300 kg de H_4SiO_4 ha^{-1} , mismos que por el proceso de biosilicificación, que ocurre en la epidermis de las hojas, es posible producir, por m^2 de hoja, 175.6 millones de fitolitos y 30 millones de tricomas. Debemos mencionar que en el maíz ocurren dos tipos de tricomas, diferenciados por su tamaño, los grandes (a) se encuentran en una densidad de 1.5 tricomas mm^{-2} , mientras que los chicos (b) muestran 27.6 tricomas mm^{-2} (**figuras 5 y 6**). Este proceso de biosilicificación ocurre también además del maíz, en trigo, arroz, caña de azúcar, avena, cebada, frijol, papa, tomate, chile, plátano, pastos, alfalfa, fresa, aguacate, guayaba, calabacita, sandía, melón, hierbabuena y manzanilla, por mencionar algunas de las plantas cultivadas.

PARTICIPACIÓN DEL SILICIO EN LA REGULACIÓN METABÓLICA Y RENDIMIENTO

El H_4SiO_4 y los silicatos solubles en el citoplasma de las células solubilizan compuestos que normalmente forman cristales, como el oxalato de calcio y fosfatos de calcio, magnesio, hierro y aluminio, mejorando la solubilidad de los cationes y el anión fosfato $[\text{HPO}_4]^{2-}$. También el H_4SiO_4 puede reemplazar al fosfato de las moléculas de DNA y RNA, que como un resultado propiamente dicho, es la nutrición con Si responsable de incrementar la estabilidad y expresión genética. Adicionalmente, el H_4SiO_4 puede formar complejos solubles con microelementos (zinc, hierro), potencializando su actividad en las células, y también puede secuestrar elementos tóxicos como el aluminio.

La asimilación de CO_2 por el proceso fotosintético se mejora por la nutrición con H_4SiO_4 , a través de inducir la mayor concentración de clorofila por unidad de área foliar (hojas muy verdes), mejorar el tamaño de las hojas y producir altas concentraciones de la enzima ribulosa bis-

fosfato carboxilasa (RUBISCO). Enzima que regula la captura de CO_2 y promueve su eficiente uso en las plantas. Por otro lado, el Si polimérico y amorfo puede mejorar el aprovechamiento de la luz solar al transformar la luz directa en luz de alta difusión. Así también, el diámetro de tallo y rama, donde se encuentra el tejido de almacenamiento de reservas de carbohidratos se ve mejorado con la asimilación de H_4SiO_4 .

La acción del H_4SiO_4 en la producción de cosecha se ejemplifica con el tratamiento con diferentes concentraciones de MPA_{Si} aplicadas al cultivo comercial de maíz en la región agrícola de Guasave, Sinaloa (**figura 7**), en el ciclo agrícola otoño-invierno 2007-08. Los resultados muestran que, con el incremento de las dosis de Si, el rendimiento de grano se mejora en más de un 10%. Los resultados han sido corroborados por diferentes productores agrícolas, que en más de mil hectáreas aplicaron al suelo MPA_{Si} , antes de la siembra, en una dosis de 500 kg ha^{-1} ($200 \text{ kg SiO}_2 \text{ ha}^{-1}$), con rendimientos en algunos casos superiores en 40%. Es importante que el Si esté soluble antes de la germinación, ya que aparentemente durante este proceso ocurre demanda de H_4SiO_4 , para que el tejido foliar que emerge realice el proceso de biosilicificación que le permita construir fitolitos y tricomas para hacer frente al estrés biótico y abiótico. Un caso relevante, ocurrido en diciembre del 2007, durante el periodo de heladas en el norte de Sinaloa: la aplicación de MPA_{Si} permitió la resistencia a temperaturas menores a los 0°C , permitiendo que el cultivo produjera 8.0 ton ha^{-1} , mientras que los cultivos no tratados en el mismo lugar se siniestraron.

Los anteriores planteamientos soportan la gran importancia que tiene en la productividad primaria y agrícola el proceso biológico de la biosilicificación, el cual puede tener un nivel de jerarquía similar al proceso biológico de la fotosíntesis (asimilación de CO_2 , energía solar y producción de carbohidratos) y del metabolismo nitrogenado (fijación de nitrógeno atmosférico y biosíntesis de proteínas).

Figura 1.



Figura 2.

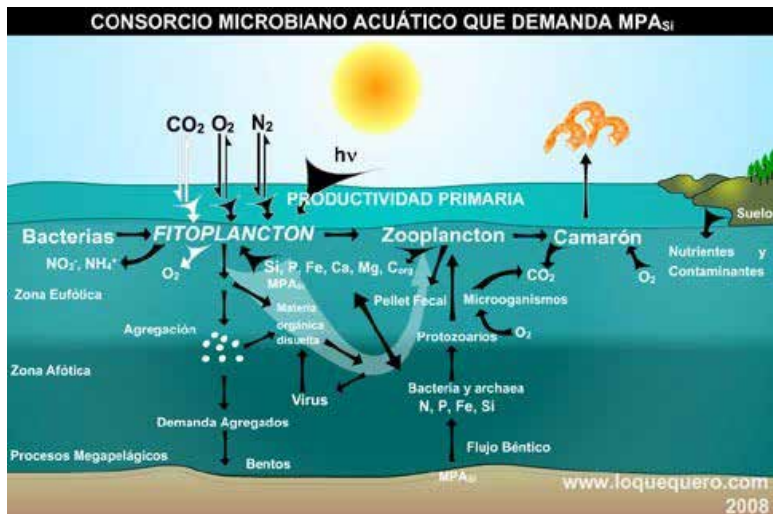


Figura 3.

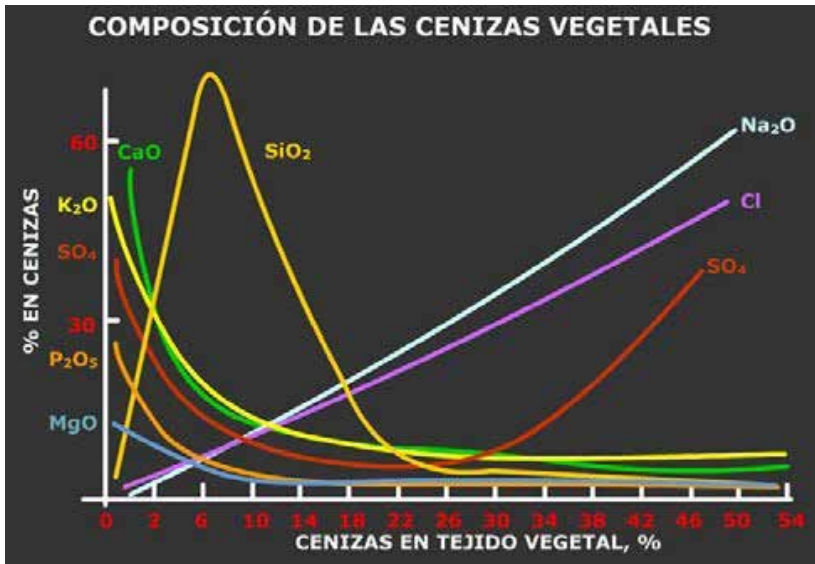


Figura 4.



Figura 5.

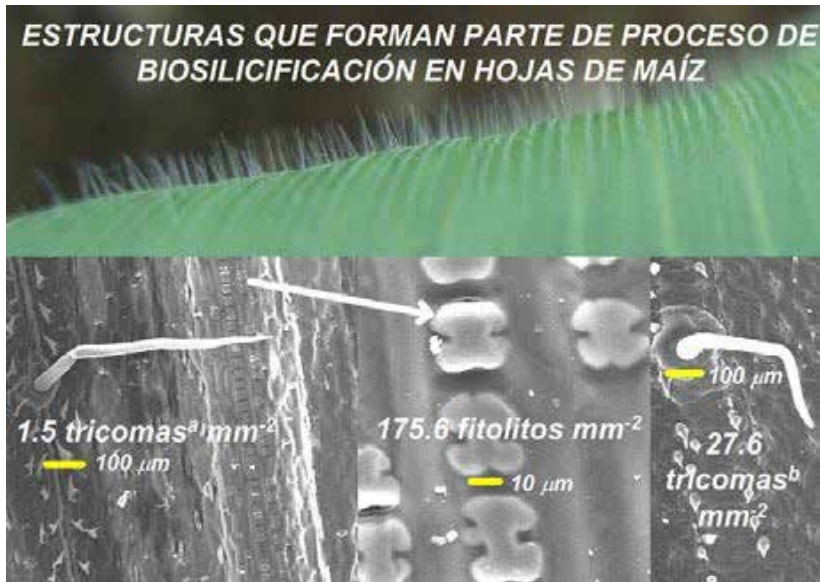
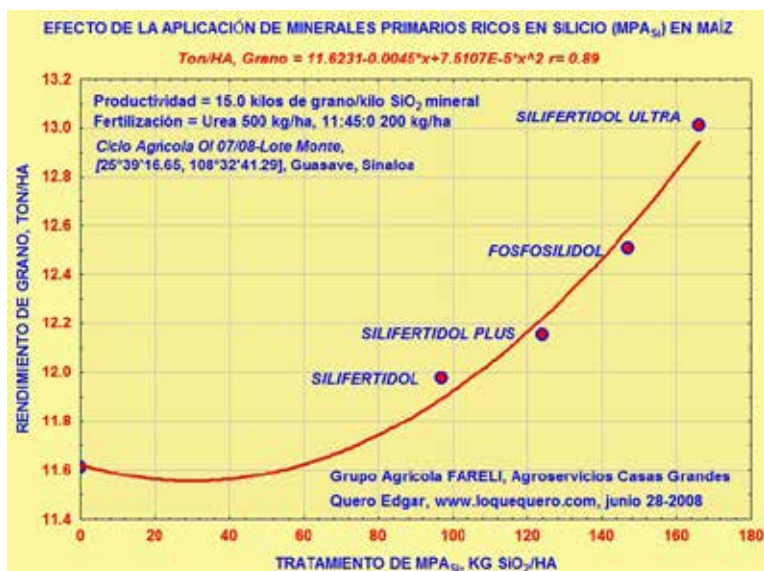


Figura 6.



Figura 7.



REGULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA Y NUTRIENTES EN LOS TEJIDOS VEGETALES

El agua es el principal componente de células y tejidos de todos los organismos (generalmente, el 95% del peso húmedo), y la manera como se regula la entrada y salida del agua (H_2O) en las células debe de ser uno de los aspectos más importante en el estudio de la fisiología de los organismos en general. El agua se está renovando continuamente y con esta se mantienen los niveles y demandas de nutrientes minerales; de igual forma se mantienen las concentraciones celulares de los gases oxígeno (O_2) y bióxido de carbono (CO_2). En las plantas cultivadas de manera general se conoce que, en promedio, de cada 100 litros de H_2O que se consumen, 0.1 litro se ocupa para el recambio de gases en el proceso de fotosíntesis, 1.9 litros para el crecimiento y desarrollo de nuevos tejidos (hoja, tallo, raíz, etc.) y 98 litros para mantener el proceso de transpiración. Por otro lado, los estudios han revelado que cerca del 10% de la humedad encontrada en la atmósfera es liberada por las plantas a través de este proceso de transpiración. El 90% restante es aportado principalmente por la evaporación del H_2O de océanos, mares, y otras aguas superficiales (lagos, ríos, arroyos, canales).

¿QUÉ ES TRANSPIRACIÓN?

La transpiración es el proceso por el cual el agua contenida en el suelo o substrato es extraída por las raíces de las plantas y conducida a través del tejido vascular (traqueidas y vasos) de los tallos a los pequeños poros (estomas) que se encuentran en la superficie inferior de las hojas (envés), donde el H_2O cambia de la fase líquida a vapor y se libera a la atmósfera. La transpiración es esencialmente evaporación de H_2O de las hojas de la planta. La transpiración también incluye al proceso de gustomación, que es la pérdida de agua en forma líquida de la hoja o del tallo, principalmente a través de los estomas y tricomas.

Gran parte del proceso de intercambio de H_2O entre los tejidos vegetales y la atmósfera (transpiración) está regulado por células y elementos de la epidermis: estomas, tricomas y fitolitos. Los estomas constan de dos grandes células guarda y oclusivas rodeadas de células acompañantes; forman parte de la epidermis del envés de las hojas, donde ocurren en una alta densidad (100 a 500 estomas mm^{-2} , dependiendo del cultivo y variables ambientales) y además pueden abrirse o cerrarse según las condiciones ambientales y la regulación metabólica-hormonal. Mientras, los tricomas son también extensiones celulares de la epidermis y ocurren en mayor densidad en el haz de la superficie foliar; la superficie de los tricomas puede estar recubierta por silicio amorfo (SiO_2) sólido y en su interior se encuentran presentes compuestos secundarios (terpenos) con actividad biológica. Tales estructuras aparentemente también regulan el flujo de agua a la atmósfera al ser el SiO_2 impermeable al H_2O . Los tricomas liberan líquidos en la parte extrema final de la estructura y pueden tener una longitud de 0.5 a 0.8 mm y una densidad de 30 tricomas mm^{-2} , permitiendo proporcionar un microclima húmedo. Por otra parte, los fitolitos, estructuras con una superficie sólida, compuesta por SiO_2 amorfo, ocurren en la epidermis del haz (área expuesta al sol). Ellos pueden cubrir una superficie de 800 a 1,000 $cm^2 SiO_2 m^{-2}$ de hoja. Estas formas sólidas de SiO_2 amorfo (“vidrio”), al estar dispersas en la superficie de las hojas expuestas al

sol, pueden reducir la entrada de luz directa, transformándola en luz difusa reduciendo la entrada de calor a las células e incrementado la radiación fotosintéticamente activa. Por otro lado, la superficie sólida mantendrá el contenido del agua en las células reduciendo la transpiración y manteniendo la temperatura interna de las células de la hoja. De manera gráfica se ilustra el planteamiento anterior en la **figura 1**.

¿CUÁNTA AGUA TRANSPIRAN LAS PLANTAS Y CUÁNTO NUTRIENTE TRANSPORTAN?

Las plantas establecen sus raíces en el suelo para extraer el agua y nutrientes minerales, y enviarlos a los tejidos que forman la canopia (tallos, hojas, flores, frutos). Como se indicó antes, gran parte del H_2O es liberado a la atmósfera por la transpiración; cuando este se suma con el H_2O de la evaporación directa del suelo, el proceso total se conoce como evapotranspiración o uso consuntivo. En promedio en las plantas cultivadas se requieren de 300 a 800 mm de H_2O de riego por ciclo y un consumo de agua de 500 a 900 kg H_2O kg⁻¹ de biomasa seca. La velocidad de la transpiración varía grandemente dependiendo de condiciones atmosféricas, tales como temperatura, humedad, disponibilidad e intensidad de la luz solar, precipitación, tipo y saturación hídrica del suelo, viento, pendiente del suelo, población benéfica microbiana del suelo y calidad del H_2O de riego, química y microbiológica (algas, bacterias, micorrizas). Durante periodos secos, la transpiración puede contribuir a la pérdida de humedad en la zona superior del suelo y promover la erosión.

La transpiración de las plantas es un proceso invisible, ya que el H_2O se está evaporando continuamente de la superficie de las hojas, y nosotros no las vemos “sudar”. Por ejemplo, un árbol de manzano con 5.0 m² de hoja libera 1.8 y 5.1 litros H_2O día⁻¹ en un día nublado y frío y en un día caliente y soleado de verano, respectivamente; una planta de tomate de invernadero libera 1.5-2.0, 1.2-1.5, 0.71-0.85 y 0.14-0.2 litros

H_2O dia^{-1} en un día soleado, soleado nublado, parcialmente nublado y nublado, respectivamente. Por otro lado, una planta de espárrago a la intemperie transpira en un día soleado 6.0 litros H_2O dia^{-1} , y una hectárea de cultivo de maíz transpira de 4.0 a 5.0 m^3 H_2O dia^{-1} . Durante una estación de crecimiento, una hoja transpirará muchas veces más agua que su propio peso.

El agua, por otra parte, disuelve los nutrientes minerales contenidos en el suelo y los aplicados externamente en los programas de fertilización, para satisfacer las demandas que la planta requiere para sostener su productividad, estimándose que, en promedio, se extraen en la solución del suelo: nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), silicio (Si) y micronutrientes, 200-300, 250-350, 60-85, 25-35, 30-50, 200-400, 10-25 kg ha^{-1} por ciclo de cultivo. Esto significa que, en el ciclo de producción, por los tejidos de la canopia (raíces, tallos y hojas) fluyen de 770 a 1,200 kilos de nutrientes además del agua, por lo que deben estar presentes en los tejidos y células de las plantas mecanismos de regulación, esto es, puertas que permitan una rápida movilización.

En toda la planta el transporte de fluidos a larga distancia ocurre mayormente a través del tejido vascular, xilema (traqueidas y vasos) el cual no presenta significativas barreras de membrana. Las traqueidas se encuentran en un aparente continuo desde la raíz hasta las hojas y frutos, tienen un diámetro de 10 a 20 micras (μm) y pueden agruparse en el tejido vascular traqueidal con 400 a 500 μm de diámetro, tal como se muestra en las fotos de microscopía electrónica de barrido de la **figura 2**.

Una presentación gráfica de los componentes de transporte y regulación del flujo de agua, estomas, tricomas, fitolitos y traqueidas, en los tejidos vegetales se muestra en la **figura 3**. También es importante destacar que el H_2O debe suplirse a las plantas en calidad, cantidad y oportunidad, por lo que se han desarrollado tecnologías para cumplir con las demandas de H_2O y nutrientes minerales. Tales tecnologías son el riego por goteo, la fertirrigación, el cultivo hidropónico, el acolchado

de suelos con películas plásticas de polietileno, el cultivo protegido bajo maya sombra, invernadero y túnel, la macro y micro meteorología con sensores remotos y recientemente la aplicación de minerales primarios ricos en silicio (MPA_{Si}) para apoyar el proceso de biosilicificación.

Los MPA_{Si} estimulan el desarrollo de tejido vascular (traqueidas) mejorando el diámetro de tallo y área foliar, el cual se puede duplicar. Con ello existe mayor fotosíntesis y tejido de transporte que reduce la ocurrencia de deficiencias nutricionales y mejora el aprovechamiento de los nutrientes presentes en el suelo, además de que el SiO_2 amorfo, formado por el proceso de biosilicificación en la epidermis foliar, proporciona confort ante las variaciones ambientales, de tal forma que se reduce la pérdida de H_2O por transpiración, aprovechando el H_2O para la construcción de biomasa y eficiencia metabólica. La regulación del flujo de agua es vital, ya que una limitada ocurrencia de H_2O en la zona radicular induce estrés hídrico causante de la reducción de la productividad e importantes procesos fisiológicos, los cuales se describen en la **figura 4**. Hasta aquí se ha mostrado la regulación de la transpiración por elementos celulares presentes en la epidermis y en el tejido vascular, pero a continuación se describe el proceso de transporte a través de células con gran actividad metabólica y fisiológica.

¿PROTEÍNAS DE LA MEMBRANA PLASMÁTICA CELULAR, QUE REGULAN EL TRANSPORTE DE AGUA Y NUTRIENTES?

Así, el tejido vivo puede ser un sitio de intenso flujo de agua durante transpiración y expansión del crecimiento. Para ello el agua puede fluir a través de varios caminos: (i) el camino del apoplasto, *i.e.*, dentro del continuo de la pared celular; (ii) la ruta del simplasto a través del continuo citoplásmico y plasmodesmos, y (iii) el camino transcelular a través de membranas celulares (mayormente membranas del plasma celular), el cual en muchos tejidos es principalmente mediado por proteínas de bajo peso molecular conocidas como acuaporinas (AQPs). Este mecanismo de transporte H_2O mediado por proteínas de mem-

brana se discute brevemente en los siguientes párrafos ya que recubre uno de los principales mecanismos de transporte del vital líquido. Se ha establecido que sólo el 10% del H_2O que demanda la planta se transporta por difusión a través de los lípidos de la membrana y el 90% se realiza a través de las proteínas de membrana AQPs.

Las acuaporinas (AQPs) son canales de proteínas (puertas reguladoras) presentes en las membranas plasmáticas e intercelulares de las células de las plantas, donde todas ellas facilitan e incrementan el transporte de H_2O y/o pequeños solutos orgánicos, glicerol ($C_3H_8O_3$), acidoláctico ($C_3H_6O_3$), neutrales, urea ($CO(NH_2)_2$), ácido bórico (H_3BO_3), ácido ortosilícico (H_4SiO_4), oxidantes, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y gases, amoníaco (NH_3) y bióxido de carbono (CO_2). Una representación gráfica de este importante transporte se muestra en la **figura 5**, destacando el transporte de ácido ortosilícico por la proteína Lsi1/OsNIP2:1 que se observa en la figura. Las AQPs juegan un papel primordial en las relaciones hídricas (flujo y turgencia) entre las células de la raíz, tallo, hoja, semillas y flores y se relacionan también con la nutrición mineral, el estrés oxidativo y la fijación de CO_2 (proceso de fotosíntesis) y nitrógeno (N_2), simbiosis entre plantas-bacterias y algas-hongos.

El término acuaporina (AQP) fue inicialmente aplicado a las proteínas incorporadas a la membrana celular transportadoras de agua (MIPs) y ahora acuaporinas se aplica a todas la MIPs de las plantas.

Las AQPs tienen muchas funciones regulatorias durante el desarrollo de las plantas y durante la adaptación a las condiciones variables del ambiente. Las acuaporinas son pequeñas proteínas que muestran una alta multiplicidad de isoformas, pudiendo encontrar en los tejidos vegetales más de 30 proteínas diferentes que transportan H_2O y nutrientes. Estas se clasifican en 4 subgrupos: Las proteínas intrínsecas de membrana plasmática (PIP) y las intrínsecas del tonoplasto son las más abundantes de membrana plasmática y vacuolar. Otro grupo lo componen las AQPs encontradas en las membranas que recubren a las bacterias que forman el nódulo en las plantas fijadoras de nitrógeno y

se conoce como proteína intrínseca del nódulo (NIPs). El cuarto grupo lo forman pequeñas proteínas básicas intrínsecas de la membrana (SIPs). Una regulación post transcripcional de las acuaporinas ocurre por la metilación, fosforilación y carboxilación de residuos de aminoácido lisina e histidina. La proteína acuaporina integrada a la membrana plasmática se muestra en la **figura 6**.

Como se puede observar, el transporte de H_2O en las células y tejidos de las plantas es complejo, pero presenta una gran posibilidad para el desarrollo de tecnologías naturales y biosintéticas que permitan mejorar el aprovechamiento del H_2O para incrementar la productividad agrícola y de alimentos, mismas que seguramente contribuirán a reducir el hambre y el calentamiento global.

Figura 1.

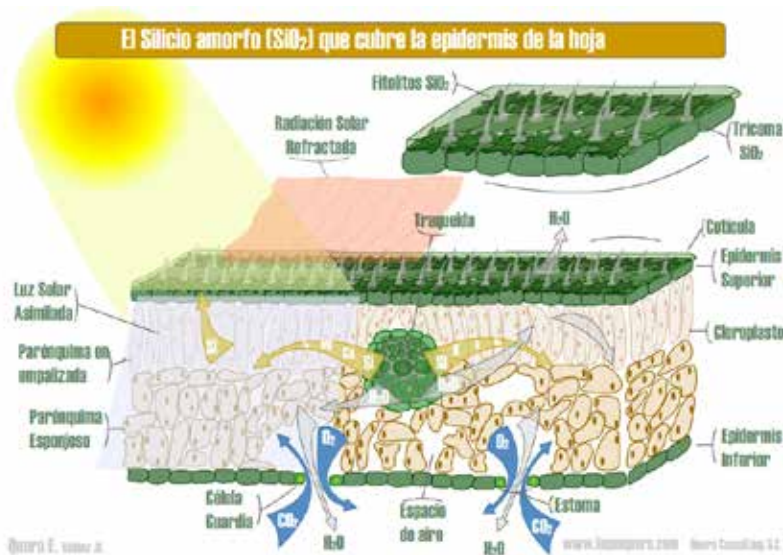


Figura 2.

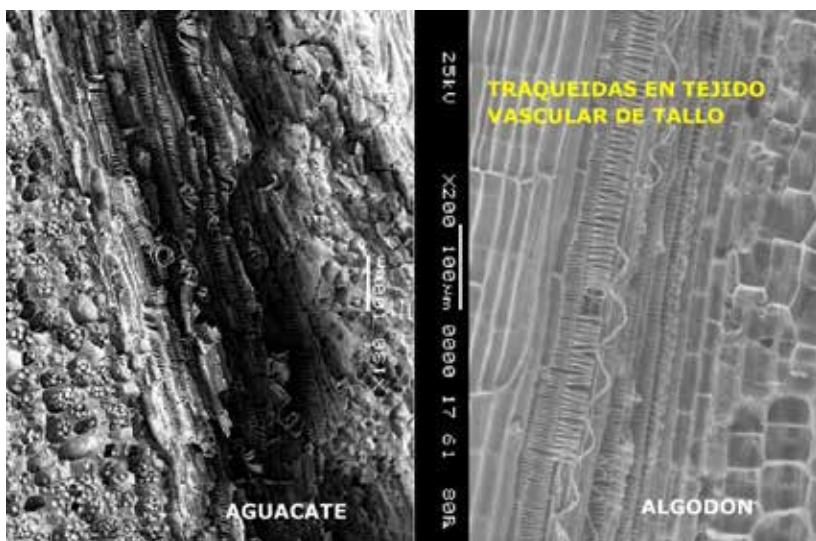
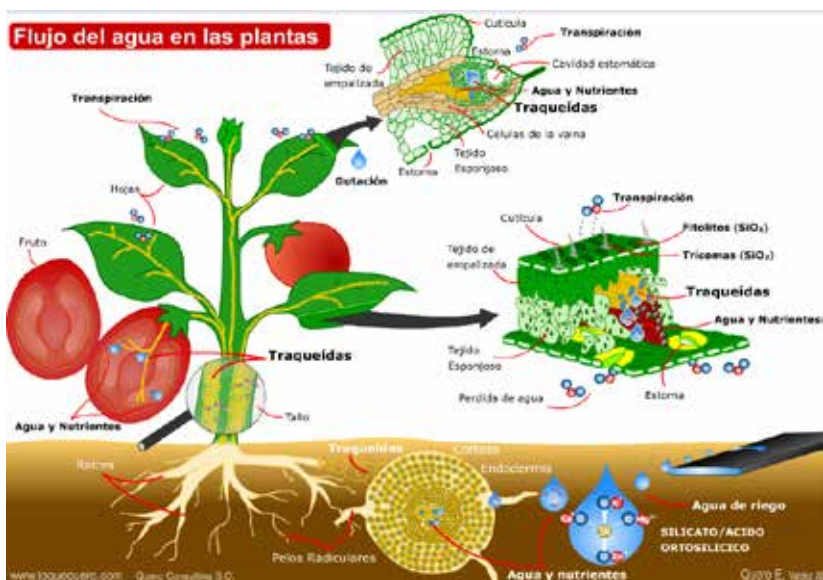


Figura 3.



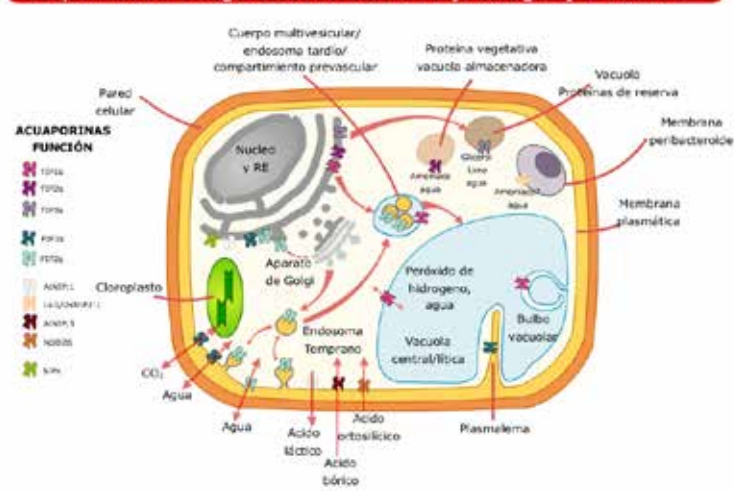


Figura 6.



ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD DEL SUELO Y LA NUTRICIÓN BIODINÁMICA

La producción maíz = Experiencia + Ciencia + Voluntad

Everardo Lovera Gómez, 27 de febrero de 2010

Federación de Productores de Maíz del Estado de México

La investigación sobre la calidad agrícola del suelo (CAS) ha avanzado al grado que existe el potencial para establecer nuevas herramientas de trabajo de campo, y proporcionar un acceso a los productores, investigadores y reguladores, al monitoreo de cambios positivos y negativos en la calidad y sustentabilidad del suelo. El número de sensores disponibles y próximos son grandes y hacen posible el análisis y diagnóstico de la variabilidad espacial y temporal del suelo, estableciendo índices que integran las funciones y atributos del suelo, y facilitando la incorporación e integración horizontal y vertical de prácticas físicas, químicas, geológicas y biológicas en el manejo del suelo, como la labranza mínima, la incorporación de fertilizantes orgánicos (composta, lombricomposta, humus), biológicos (bacterias, diatomeas, hongos), químicos (urea, cloruro de potasio) y minerales (minerales primarios

ricos en silicio), el entarquinamiento (cajas de agua) y la plasticultura (riego por goteo, acolchado de suelos, invernadero), entre otros.

El índice de calidad agrícola del suelo (ICAS) y el índice agrícola de sustentabilidad del suelo (IASS) se fundamentan en el reconocimiento y en la dimensión temporal y cuantitativa de los límites y potencialidades del suelo para soportar el desarrollo, crecimiento y evolución resiliente de organismos fotosintéticos y microbianos que constituyen la productividad primaria y que son el soporte del desarrollo de la cadena alimentaria (CA), por lo tanto, permiten cuantificar el patrimonio encontrado en nuestros pies, el suelo.

Este patrimonio tiene las siguientes funciones:

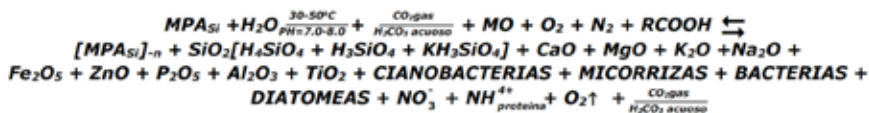
- a. Eficaz en el ciclo biogeoquímico de los nutrientes (silicio, calcio, potasio, fósforo, nitrógeno, etc.), minimizando la lixiviación y escurrimiento, y facultando la disponibilidad para los organismos fotosintéticos (OF) y microbianos (OMIC).
- b. Maximizar la capacidad de almacenamiento de agua y minimizar el escurrimiento y la erosión.
- c. Adsorber y filtrar el exceso de nutrientes, sedimentos y contaminantes.
- d. Proveer hábitat y un ambiente sano a las raíces de OF y los OMIC del suelo.
- e. Cimiento estable para el desarrollo de comunidades de OF y OMIC que constituyen la cadena alimentaria, sustento del desarrollo de la humanidad.
- f. Eficaz en la adsorción de $\text{CO}_{2\text{gas}}/\text{CO}_{2\text{liquido}}$.
- g. Muestra una disolución incongruente, efectiva en la liberación controlada de nutrientes, acorde con la demanda y las condiciones del medio ambiente.

De acuerdo con estas funciones, el patrimonio suelo tiene atributos físicos, químicos y biológicos, que se cuantifican con la finalidad de observar relaciones con la productividad agrícola y la capacidad de producción de alimentos.

Algunos de estos atributos son:

Físico	Químico	Biológico
Materia orgánica	Materia Orgánica	Carbón en OMIC
Textura	Fuente de nutrientes	N en OMIC
Profundidad	pH	Biomasa total OMIC
Estructura	Conductividad eléctrica (μS)	Respiración del suelo (O ₂ /CO ₂)
Aireación	Potencial óxido-reducción (mV)	Respiración de la biomasa (CO ₂ /O ₂)
Estabilidad de agregados	Disponibilidad de contaminantes	Actividad de enzimas
Densidad aparente	Velocidad del ciclo biogeoquímico de nutrientes (Si, C, N, Fe, H, O, P, K, Mg, Na, Ca)	Biodiversidad OMIC
Mineralogía de arcilla	Disponibilidad de nutrientes para OF y OMIC	Biosilicificación (cuerpos SiO ₂ ·nH ₂ O)
Color	Contenido de nutrientes para OF y OMIC	Biocalcificación (CaCO ₃ , oxalato de Ca)
Consistencia	Potencialidad de N mineralizable (N _{min}) N ₂ + Norg = NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻	Bacterias fotosintéticas (cianobacterias)
Velocidad de difusión, O ₂ , CO ₂ , N ₂	Carbón orgánico total	Diatomeas
Distribución del tamaño de partículas	Silicio total y disponible	Bacterias fijadoras de nitrógeno y cianobacterias
Capacidad de retención de agua	Fósforo disponible y total	Micorrizas
Infiltración	Aluminio disponible y total	Cuerpos de silicio
Disolución	Hierro, Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, total y disponible	Consorcio microbiano (sideróforos)

La interacción entre funciones y atributos del suelo se puede representar por la siguiente reacción incongruente y manejo sustentable:



Con el análisis cuantitativo, cualitativo y el balance entre ellos, se diagnostica el IASS, fundamentando cuánto es posible extraer y/o se debe reponer para el desarrollo sustentable y resiliente de la CA.

La reacción enfatiza que la presencia en cantidad y disponibilidad de minerales primarios, MPA_{Si} –los cuales en promedio en un suelo productivo componen el 90% del total de minerales– es la base para el inicio de la productividad primaria compuesta por OMIC y OF. Los MPA_{Si} se encuentran disponibles mayormente en las partículas sólidas con un diámetro entre 5 y 500 μm (arena y limo). Aunque la concentración de silicio (Si) es variable en cada uno de los más de 1,300 minerales descritos en la literatura, se puede considerar que aquellos que contienen entre 15 y 30% de Si en su composición química son adecuados para el desarrollo de la agricultura, además de que son fuente de Ca, Mg, K, Fe, Zn, Na, Cu, Mn, P, S. En general un buen suelo agrícola debe tener en promedio 25% de Si, por lo que se establece que un suelo agrícola sustentable debe contener minerales ricos en Si.

Dentro de las herramientas modernas para el análisis y diagnóstico del patrimonio suelo, se encuentra la microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplada a microsonda analítica de rayos X, tanto de dispersión (EDS) como de fluorescencia (XRF). Esta permite observar las dimensiones, formas y agregados de las partículas sólidas y orgánicas del suelo o tejido, y cuantitativamente determinar su composición elemental. Un equipo representativo se muestra en la **figura 1**, el cual está integrado por un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS) marca Oxford modelo Inca 250 y espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XFR) acoplados a un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-6390 LV LGS.

El IASS se genera matemáticamente por ecuaciones basadas en las relaciones entre funciones y atributos, tal como la que se muestra en la **figura 2**, mismas que son reguladas por las variaciones estacionales y temporales que impactan en la composición química cuantitativa total de los MPA_{Si} que constituyen el suelo, C (orgánico y carbonatos), CaO ,

MgO, SiO₂, K₂O, Na₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅, TiO₂, MnO. Comúnmente, la disolución incongruente de los MPA_{Si} puede ser regulada por la acción de:

- Tamaño de las partículas de suelo (arcilla, limo, arena).
- Clima, radiación solar y temperatura,
- Agua (H₂O), lluvia y riego,
- Bióxido de carbono gaseoso y disuelto (H₂CO₃/CO₂), aportado por la atmósfera del suelo, sistema radicular y el originado por la descomposición de los esquilmos agrícolas y/o materia orgánica (MO), el cual además produce ácidos húmicos (R_{HA}COOH),
- Nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) atmosférico, que generalmente se encuentran en una concentración del 75 y 21%, respectivamente, importantes para el flujo de energía y producción de proteínas en los organismos fotosintéticos y microbianos de la productividad primaria.
- Microorganismos, fotosintéticos y no fotosintéticos (cianobacterias, diatomeas, hongos micorrízicos y filamentosos, etc.).
- Variables fisicoquímicas de extractos acuosos del suelo, concentración de protones hidrógeno (pH), concentración de sales disueltas (C.E., μS) y potencial óxido-reducción (REDOX, mV).

Los datos característicos de composición total del suelo agrícola, obtenidos de diferentes regiones, con diferente productividad y condiciones de clima, se muestran en la **tabla 1**. Con ellos se realizan cálculos donde se consideran las relaciones moleculares entre los elementos calcio, magnesio, sodio y potasio como altamente sensibles a la intemperización, mientras que el hierro y silicio de mediana respuesta y al aluminio como de muy baja respuesta. Es importante destacar que los OF y los OMIC de la productividad primaria requieren de Si como un nutriente inexorablemente ligado a su reproducción, productividad y respuestas fisiológicas de resiliencia y evolución.

Tabla 1. Índice agrícola de sustentabilidad del suelo (IASS) y composición mineral del suelo con actividad de organismos fotosintéticos y su relación con el pH de la solución acuosa (pH ~ 7.0), obtenida por suspensión durante 40 min y agitación eventual. El análisis se realizó por la técnica EDS-X. Los resultados se expresan en % de muestras secas.

Elemento 4.5-5.0		pH en la solución del suelo (1:1)						
		5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
Silicio	Si	13.49	14.16	16.26	18.38	19.71	19.51	20.67
Oxígeno	O	54.33	55.49	57.58	56.29	58.38	60.72	58.17
Aluminio	Al	10.45	10.40	10.15	9.22	6.65	6.87	6.68
Carbón	C	9.52	11.92	8.96	8.67	9.42	7.87	8.55
Calcio	Ca	0.88	0.73	0.56	0.86	0.79	0.48	0.79
Fósforo	P	0.36	0.36	0.22	0.17	0.12	0.08	0.07
Hierro	Fe	5.34	5.05	4.23	3.99	2.16	1.80	2.03
Magnesio	Mg	0.38	0.35	0.29	0.53	0.73	0.63	0.63
Potasio	K	0.38	0.34	0.59	0.68	1.11	1.17	1.40
Titanio	Ti	0.59	0.56	0.45	0.44	0.23	0.21	0.22
Sodio	Na	0.41	0.28	0.33	0.48	0.53	0.52	0.57
Silicio/Oxígeno	Si/O	0.25	0.26	0.28	0.33	0.34	0.32	0.36
Silicio/Aluminio	Si/Al	1.29	1.36	1.60	1.99	2.96	2.83	3.09
Carbón/Silicio	C/Si	0.71	0.84	0.55	0.47	0.48	0.40	0.41
IASS	%	1.39	0.82	1.55	4.38	10.36	9.70	13.56

Un IASS de 30-40% se determinó como el mejor para una productividad agrícola sustentable.

Una adecuada, eficiente y racional administración del patrimonio suelo, mediante el monitoreo del IASS, permitirá mejorar la productividad primaria, para promover el desarrollo de la cadena alimentaria (CA) y, consecuentemente, el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras.

Del planteamiento anterior se deriva la cuantificación de los IASS para la producción de maíz en condiciones de temporal en la región maicera del gran Valle Alto del Estado de México, que incluye, en el norte, los municipios de Temascalcingo y Acambay; al sur, Calimaya; al oriente los municipios de Jiquipilco, Temoaya y Otzolotepec, y al poniente,

Villa Victoria y Villa de Allende. En la región, existe una gran diversidad genética en los maíces criollos, con un rendimiento de grano que varía entre 2.5 a 10.0 ton ha⁻¹, por ello resulta importante cuantificar la respuesta a la aplicación de tecnología de fertilización, biológica (consorcio microbiano), química, minerales amorfos ricos en silicio, compostas, minerales y químicos con alto índice de sustentabilidad para mejorar el IASS.

Los productores agrícolas miembros de la Federación de Productores de Maíz del Estado de México (FPMEM), distribuidos en el gran Valle Alto, conociendo la importancia de incorporar tecnología y prácticas agrícolas para el manejo sustentable del suelo para mejorar la cadena productiva del maíz, a partir de una mayor producción de grano y forraje en calidad y cantidad, aplican un paquete tecnológico para el manejo del IASS en una superficie mayor a 2,000 hectáreas, el cual consiste en aplicar en la siembra una fertilización de fondo integrada por composta, mineral primario MPA_{Si}-P (O4mas®), consorcio microbiano, micorrizas y *azospirillum* y fertilización mínima de NPK.

Tabla 2. IASS de suelos típicos del gran Valle Alto del Estado de México (región Atlacomulco) y de compostas empleadas en el programa de mejoramiento del patrimonio suelo y fertilización del cultivo. Se aplican 200 a 300 kg ha⁻¹ de composta normal más fertilización química o de 300 a 400 kg ha⁻¹ de composta mineralizada con MPA_{Si}-P (O4+®) y fertilización química reducida.

Elemento 1		Suelo				Composta	
		2	3	4	Normal	MPA _{Si} -P	
Carbón	C	4.69	5.66	8.08	9.30	17.08	12.92
Silicio	Si	25.28	24.52	28.35	25.11	12.65	5.23
Titanio	Ti	0.40	0.55	0.56	0.00	0.00	0.00
Aluminio	Al	6.77	6.82	7.42	6.09	3.38	2.17
Hierro	Fe	2.62	2.74	3.60	2.83	1.25	2.63
Magnesio	Mg	0.31	0.27	0.42	0.65	0.09	0.78
Calcio	Ca	1.03	1.30	1.75	1.05	4.52	6.69
Sodio	Na	0.77	1.06	0.97	0.88	0.95	0.41

Potasio	K	0.53	0.59	0.67	0.56	1.16	5.75
Fósforo	P			0.64		0.52	3.85
Oxígeno	O	55.11	54.56	53.91	54.25	51.16	44.63
Azufre	S					2.02	1.49
Nitrógeno	N	3.09	2.51			9.14	7.34
Zinc	Zn						1.74
Cloro	Cl		0.19				4.51
	pH	5.20	4.50	6.00	6.00	7.50	7.60
Redox	mV	259.00	328.00	301.00	287.00	205.00	166.00
C.E.	mS	203.00	200.00	376.00	286.00	>2000	>2000
IASS	%	3.51	6.26	9.50	11.74	65.44	238.81

El monitoreo con las herramientas MEB, EDS y XRF del paquete tecnológico establecido en el ciclo 2010 por los productores de maíz de la FPMEM para mejorar el IASS nos muestra los siguientes resultados:

- Una buena germinación y desarrollo de plántula (**figura 3**).
- Colonización del suelo por una diversidad microbiana (**figura 4**).
- Disolución de las partículas del suelo, inducida por MO y la diversidad microbiana (**figura 4**).
- Colonización de la raíz por micorrizas (**figura 5**).
- Una mejor nutrición de la planta con adecuada distribución de nutrientes, estableciendo la importancia del Si en los mecanismos fisiológicos y de protección del tejido foliar (**figuras 6 y 7**).

El desarrollo del cultivo presenta un buen porte, con tallos vigorosos y buena capacidad de almacenamiento de reservas (mayor diámetro); un área foliar robusta y erecta; buen desarrollo de mazorca, y baja incidencia de plagas.

Un fundamento del desarrollo de la sustentabilidad, con base en la fertilidad con minerales MPA_{Si} es la técnica del entarquinamiento, que se practicó en la irrigación de cultivos de trigo, calabaza y lino en las riberas del río Nilo por los egipcios unos 5,000 años antes de nuestra

era. Esta práctica permitió, además de irrigar, enriquecer al campo de cultivo con partículas de la corteza del suelo recientemente meteorizada e intemperizada, sobre el cual se desarrollan microorganismos como las cianobacterias y diatomeas, que enriquecían con nitrógeno y materia orgánica, mejorando notablemente la fertilidad de los suelos. En México esta práctica se desarrolló desde 1910 bajo el concepto de cajas de agua, como una manera de retener y conducir el agua de lluvia; algunos sitios aún practican este sistema de riego y enriquecimiento del suelo con MPA_{Si} , como es el caso de la región de Tamándaro, en Zamora, Michoacán.

Figura 1. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).



Figura 2. Relación entre funciones y atributos del suelo.

INDICE DE INTEPERIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA Y SU RELACIÓN CON SiO_2 Y EL pH

$$\text{I.I. PARKER} = -22.3595 - 13.136 \cdot \text{SiO}_2 + 17.2769 \cdot \text{pH} + 1.2607 \cdot \text{SiO}_2^2 + 0.3172 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{pH} - 1.2079 \cdot \text{pH}^2$$

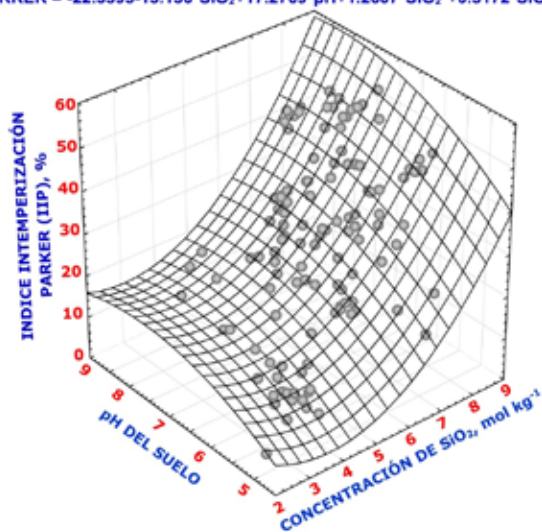


Figura 3. Desarrollo de plántula de maíz criollo.



Figura 4. Microorganismos del suelo y la disolución de minerales.

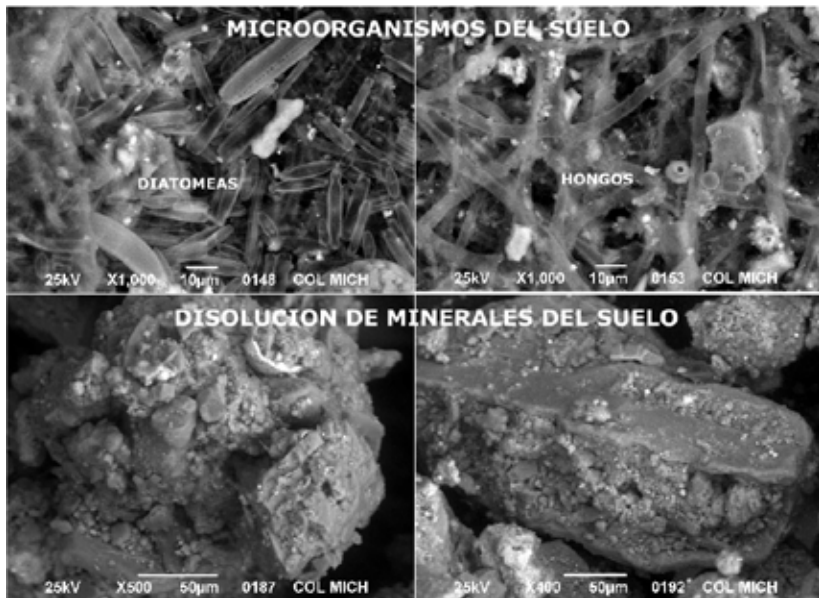
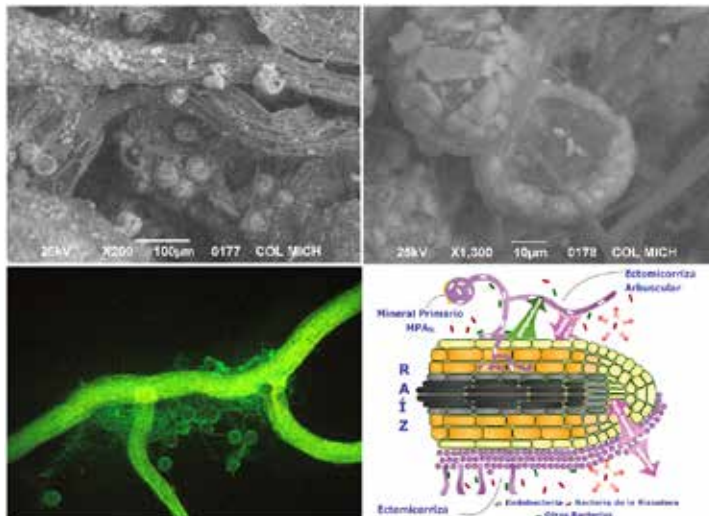
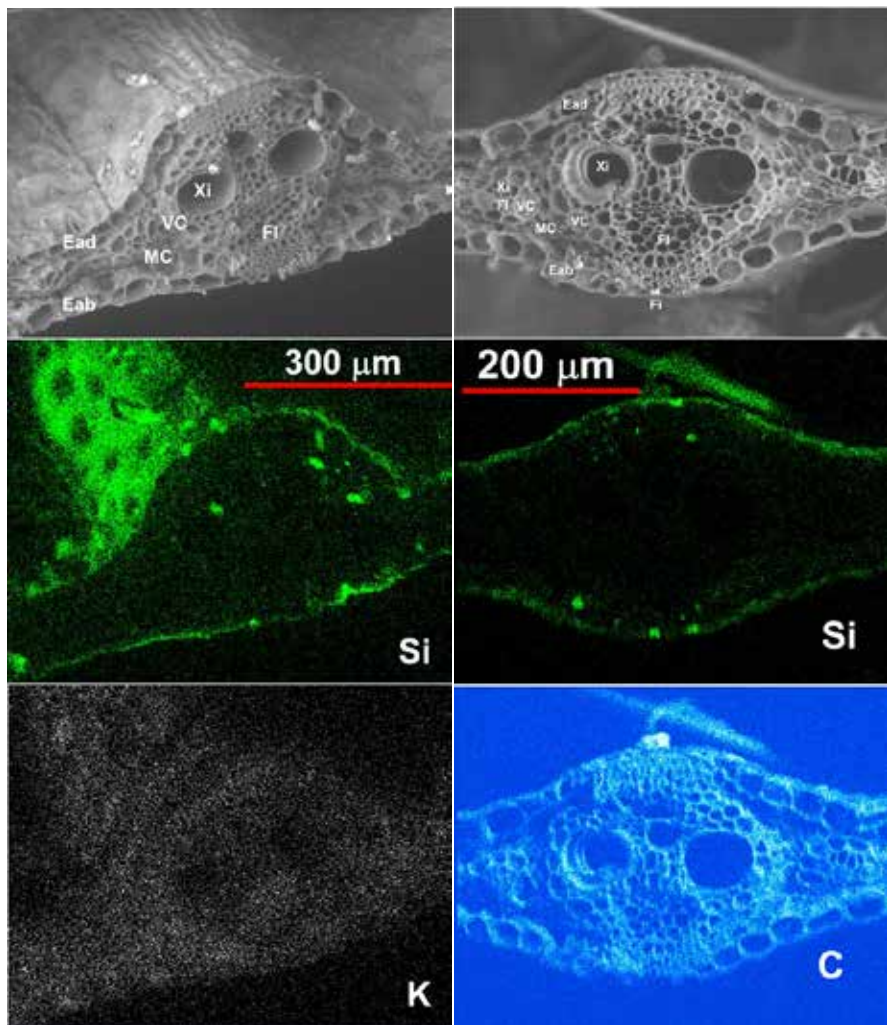


Figura 5. Micorrizas y minerales del suelo.



Figuras 6 y 7. El silicio, presente en la epidermis de la hoja de maíz.



Planta criolla de maíz



MANEJO SUSTENTABLE 4M-MAS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PRIMARIA

La biogeoquímica es una herramienta que emplea la química, física y geología para comprender procesos biológicos y entender cómo funciona, de modo sustentable, la productividad primaria en la corteza continental y oceánica, y cómo se satisface la demanda para el desarrollo de los organismos superiores de la productividad secundaria. Ello desde el nivel de organización celular hasta el ecosistema que conforman, permitiendo comprender su respuesta a fenómenos como la erosión del suelo, el cambio climático y la contaminación del agua, y cómo impactan en la producción agrícola, pecuaria y acuícola, de tal manera que sea viable predecir las herramientas tecnológicas necesarias para satisfacer la producción de alimentos que demanda el logro de mínimos de bienestar humano.

La productividad primaria está compuesta por organismos que acumulan biomasa, energía y moléculas orgánicas que regulan la resiliencia y el confort, a partir de agua, radiación solar y sales. Estas últimas, producto de la disolución incongruente de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) que componen la corteza terrestre.

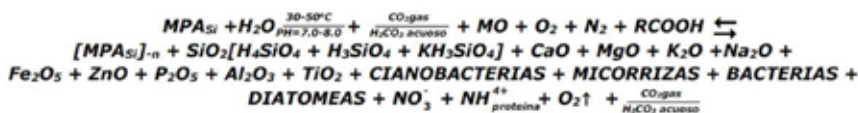
Permanentemente, la corteza terrestre muestra un flujo de minerales, a través, principalmente, por el proceso de erosión causado por la ra-

diación solar (λ), agua (H_2O) y el bióxido de carbono hidratado (CO_2/H_2CO_3), que permite, que la roca sólida se fragmente en diferentes tamaños de partícula hasta la formación de sales solubles, lo cual da lugar a una capa de varios centímetros a metros, que denominamos suelo.

El suelo es patrimonio para el desarrollo de la productividad primaria. Dependiendo de su composición química y el grado de intemperización, permite, en promedio, disponer de 550.0 g m^{-2} de sólidos en la capa de suelo de 50 cm; a través de los procesos de disolución, es posible extraer sales solubles con un contenido de: oxígeno (55%), silicio (28%), carbono (9%), hierro (5%), aluminio (5%), calcio (2%), magnesio (2%) y potasio (3%). Los procesos naturales de disolución de MPA_{Si} incluyen la erosión física, mecánica, química y biológica. Las tres últimos se proponen como factibles de regular para el desarrollo sustentable de la vida en planeta Tierra.

En el Laboratorio de Análisis para el Diagnóstico del Patrimonio, con base en el análisis químico elemental, obtenido en un microscopio electrónico acoplado a microsonda de rayos X de energía dispersiva y de fluorescencia, se analizan muestras de suelo colectadas en diferentes sistemas de producción primaria, con las que se establecieron parámetros matemáticos empíricos, que se integran en un índice de productividad primaria del suelo (IPPS), que tiene una escala de 0 a 50, siendo el más alto el adecuado para el desarrollo sustentable de la productividad primaria.

El IPPS nos indica la cantidad de MPA_{Si} disponible y el necesario de reponer, para que la disolución de sales satisfaga la demanda de nutrientes de la productividad primaria. El modelo empírico del IPPS se puede representar en la siguiente ecuación:



Aquí destaca disponibilidad y concentración de H_2O y CO_{2g} en la atmósfera del suelo, la presencia de materia orgánica formadora de CO_{2ac} a través de la acción microbiana (integrantes de la productividad primaria), y la acción directa de microorganismos sobre los MPA_{Si} . Las sales disueltas son asimiladas por los integrantes de la productividad primaria; algunos elementos minerales que componen estas son parte de procesos de mineralización, formando estructuras sólidas, como son el silicio, calcio y fósforo, mismos que participan en ciclos biogeoquímicos.

El seguimiento y control de los ciclos biogeoquímicos permiten establecer formas de promover el desarrollo sustentable de la productividad primaria.

Con base en el IPPS y las reglas de disolución de los MPA_{Si} , se establecen amplias pruebas de manejo de la productividad primaria, que incluyen la productividad agrícola de granos y hortalizas y la producción acuícola de camarón y peces.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre la calidad agrícola del suelo ha avanzado al grado que existe el potencial para establecer nuevas herramientas de trabajo en campo y laboratorio, para proporcionar un acceso a los productores, investigadores y administradores al monitoreo de cambios positivos y negativos en la calidad y sustentabilidad del suelo. El número de sensores disponibles y próximos es grande, y hacen posible el análisis y diagnóstico de la variabilidad espacial y temporal de la disolución incongruente del suelo, estableciendo índices que integren sus funciones y atributos. Asimismo, facilitando la incorporación e integración horizontal y vertical de prácticas físicas, químicas, geológicas y biológicas en el manejo del suelo, como la labranza mínima, la incorporación de materiales orgánicos líquidos y sólidos (materia orgánica funcional, lombricomposta, humus), biológicos (bacterias, diatomeas, hongos), químicos (urea, cloruro de potasio) y minerales

(minerales primarios ricos en silicio); también, el entarquinamiento (cajas de agua), la plasticultura (riego por goteo, acolchado de suelos, agricultura protegida), entre otros. Algunas de estas prácticas son importantes en la fijación, asimilación y mineralización del nitrógeno en la capa productiva del suelo. Todo ello con el fin de proporcionar la nutrición biodinámica de los cultivos y cosechas, con un desarrollo sustentable y que además se remedie a los suelos erosionados.

El índice de calidad agrícola del suelo (ICAS) y el índice agrícola de sustentabilidad del suelo (IASS) se fundamentan en el reconocimiento y en la dimensión temporal y cuantitativa de los límites y potencialidades del suelo para soportar el desarrollo, crecimiento y evolución resiliente de organismos fotosintéticos y microbianos que constituyen la productividad primaria y que son el soporte del desarrollo de la cadena alimentaria (CA), por lo tanto, permiten cuantificar el patrimonio encontrado en nuestros pies, el suelo.

En el suelo ocurre una masiva movilización de carbón (C), silicio (Si), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe), fósforo (P), nitrógeno (N), zinc (Zn), boro (B), cobre (Cu), azufre (S) y otros elementos, en una interacción dinámica entre los minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) y organismos vivos. Movilización regulada por factores abióticos (agua, temperatura, radiación solar, etc.) y la diversidad, consorcio, densidad y capacidad de biomineralización de los organismos vivos. El desarrollo holístico de esta relación, entre procesos de disolución, producción y descomposición, se denomina ciclo biogeoquímico. Para entender y cuantificar esta relación y proponer técnicas que permitan el desarrollo sustentable de los organismos vivos, se plantea lo siguiente:

Este patrimonio suelo compuesto principalmente por MPA_{Si} tiene las siguientes funciones:

- a. Eficaz en el ciclo biogeoquímico de los nutrientes (silicio, calcio, potasio, fósforo, nitrógeno, etc.), minimizando la lixiviación y escurrimiento y fa-

- cultando la disponibilidad para los organismos fotosintéticos (OF) y microbianos (OMIC).
- Maximizar la capacidad de almacenamiento de agua y minimizar el escurrimiento y la erosión.
 - Adsorber y filtrar el exceso de nutrientes, sedimentos y contaminantes.
 - Proveer hábitat y un ambiente sano a las raíces de OF y los OMIC del suelo.
 - Cimiento estable para el desarrollo de comunidades de OF y OMIC que constituyen la cadena alimentaria, sustento del desarrollo de la humanidad.
 - Eficaz en la adsorción de $\text{CO}_{2\text{gas}}/\text{CO}_{2\text{líquido}}$.
 - Muestra una disolución incongruente de los MPA_{Si} , efectiva en la liberación controlada de nutrientes, acorde con la demanda y las condiciones del medio ambiente.
 - A través del manejo del ciclo biogeoquímico, es posible el manejo sustentable de recursos.

De acuerdo con estas funciones, el patrimonio suelo tiene atributos físicos, químicos y biológicos, que se cuantifican con la finalidad de observar relaciones con la productividad primaria y la capacidad de producción de alimentos. Algunos de estos atributos son:

Atributos Físicos	Atributos Químicos	Atributos Biológicos
Materia orgánica	Materia orgánica	Carbón en OMIC
Textura	Fuente de nutrientes	N en OMIC
Profundidad	pH	Biomasa total OMIC
Estructura	Conductividad eléctrica (μS)	Respiración del suelo (O_2/CO_2)
Aireación	Potencial óxido-reducción (mV)	Respiración de la biomasa (CO_2/O_2)
Estabilidad de agregados	Disponibilidad de contaminantes	Actividad de enzimas, ectohidrolíticas y endohidrolíticas
Densidad aparente	Velocidad del ciclo biogeoquímico de nutrientes (Si, C, N, Fe, H, O, P, K, Mg, Na, Ca)	Biodiversidad OMIC
Mineralogía de arcilla	Disponibilidad de nutrientes para OF y OMIC	Biosilicificación (cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
Color	Contenido de nutrientes para OF y OMIC	Biocalcificación (CaCO_3 , oxalato de Ca)
Consistencia	Potencialidad de N mineralizable (N_{mn}) $\text{N}_2 + \text{Norg} = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$	Biominales (fitatos~P~K~Mg)

Velocidad de difusión, O ₂ , CO ₂ , N ₂	Carbón orgánico total	Bacterias fotosintéticas (cianobacterias), fijadoras de nitrógeno
Distribución del tamaño de partículas	Silicio total y disponible	Diatomeas
Capacidad de retención de agua	Fósforo disponible y total	Micorrizas
Infiltración	Aluminio disponible y total	Cuerpos de silicio
Disolución	Hierro, Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, total y disponible	Consortios microbianos (sideróforos)
Lixiviación	Contenido y composición de ácidos húmicos	Consortios microbianos (degradación de MO)

Por otro lado, en la siguiente **tabla 1**, se muestra la composición elemental de algunos de los más de 1500 MP_{Si} que ocurren en los suelos agrícolas, los cuales en promedio proveen en la superficie arable de 30 cm de una hectárea, 1,800, 800, 300, 180, 180, 60 60, 40, 35, 15, 8, 8, 2.5, 0.4, 04, ton de O, Si, C, Fe, Al, Ca, K, Mg, Na, N, Ti, P, Mn, Zn y Cl, respectivamente. Se evidencia que, si estos nutrientes se disolvieran, muy poco se requeriría de nutrientes externos.

Tabla 1. Composición elemental de algunos minerales primarios que componen el suelo. La cuantificación se realizó por la técnica EDS-X y se expresa en % de muestras secas.

Elemento	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
SiO ₂	39.10	42.24	44.70	46.40	51.10	52.60	58.81	63.30	64.40	65.63
Al ₂ O ₃	2.13	37.68	38.45	34.14	2.38	29.07	27.16	21.30	20.78	22.37
Fe ₂ O ₃	2.75	0.36	0.01		8.62	0.49	0.34	0.14	0.04	0.04
FeO	4.85	0.37	3.82	0.49	0.08	0.26	0.22	0.06	0.34	0.03
MnO	0.04	0.01	0.03	0.01	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
MgO	49.25	0.39	0.72	0.33	13.03	0.54	0.07	0.36	0.03	0.02
CaO	0.18	17.04	1.00	13.99	23.50	12.00	3.61	1.25	0.04	0.17
P ₂ O ₅	0.06	0.11	0.06	0.11	0.08	0.06	0.11	0.06	0.09	0.54
Na ₂ O	0.62	1.35	0.96	3.50	0.50	4.50	8.02	2.50	4.85	10.64
K ₂ O	0.02	0.27	9.42	0.55	0.05	0.25	1.07	10.60	9.06	0.71
H ₂ O ⁺	0.10	0.10	0.40	0.44	0.60	0.20	0.55	0.40	0.54	0.25

A) olivina, B) anortita, C) moscovita, D) bytownita, E) augita, F) labradorita, G) ortoclase, H) microclina, I) K-plagioclase, J) albita.

La disolución típica de MPA_{Si} se muestra en la **tabla 2** y **figura 1**, destacando que, después de tres semanas en la presencia de agua (H_2O) y bióxido de carbono (CO_2), se liberan nutrientes que pasan a la solución del suelo y son disponibles para su asimilación por los organismos vivos.

Tabla 2. Disolución incongruente de minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}) en presencia de H_2O y CO_2 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3$)

MPA_{Si}	Composición química más H_2O y CO_2	Productos de disolución
Plagioclase	$\text{Na}_{0.58}\text{Ca}_{0.42}\text{Al}_{1.42}\text{Si}_{2.58}\text{O}_8 + 4.45 \text{H}_2\text{O} + 1.42 \text{CO}_2$	$0.42 \text{Ca}^{2+} + 0.58 \text{Na}^+ + 1.16 \text{H}_4\text{SiO}_4^\circ + 0.71 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 1.42 \text{HCO}_3^-$
Hornblenda	$\text{Na}_{0.45}\text{Ca}_{1.90}\text{Mg}_{2.33}\text{Fe}^{2+}_{1.98}\text{Al}_{0.80}\text{Si}_{6.53}\text{Al}_{1.45}\text{Ti}_{0.02}\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 17.94 \text{H}_2\text{O} + 10.89 \text{CO}_2 + 0.50 \text{O}_2$	$1.90 \text{Ca}^{2+} + 0.45 \text{Na}^+ + 2.33 \text{Mg}^{2+} + 2.18 \text{Al}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}(\text{OH}) + 4.48 \text{H}_4\text{SiO}_4^\circ + 1.02 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 0.02 \text{Fe}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_2(\text{OH})_{0.05} + 10.89 \text{HCO}_3^-$
Biotita	$\text{K}_{0.86}\text{Mg}_{1.21}\text{Ti}_{0.09}\text{Fe}^{2+}_{1.25}\text{Al}_{0.40}\text{Si}_{3.00}\text{Al}_{1.00}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 7.81 \text{H}_2\text{O} + 4.53 \text{CO}_2 + 0.31 \text{O}_2$	$0.63 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 0.86 \text{K}^+ + 1.21 \text{Mg}^{2+} + 1.39 \text{Al}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}(\text{OH}) + 1.74 \text{H}_4\text{SiO}_4^\circ + 0.09 \text{Fe}_{0.05}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_2(\text{OH})_{0.05} + 4.53 \text{HCO}_3^-$
Epidota	$\text{Ca}_{1.96}\text{Fe}^{3+}_{0.77}\text{Al}_{2.23}\text{Si}_{3.00}\text{O}_{12}(\text{OH}) + 5.70 \text{H}_2\text{O} + 3.92 \text{CO}_2$	$1.96 \text{Ca}^{2+} + 0.86 \text{Al}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}(\text{OH}) + 0.86 \text{H}_4\text{SiO}_4^\circ + 1.07 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 3.92 \text{HCO}_3^-$
Vermiculita	$\text{Ca}_{0.10}\text{K}_{0.35}\text{Mg}_{1.21}\text{Ti}_{0.09}\text{Fe}^{3+}_{0.68}\text{Fe}^{2+}_{0.25}\text{Al}_{0.40}\text{Si}_{3.09}\text{Al}_{0.96}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6.58 \text{H}_2\text{O} + 3.22 \text{CO}_2 + 0.06 \text{O}_2$	$0.10 \text{Ca}^{2+} + 0.35 \text{K}^+ + 1.21 \text{Mg}^{2+} + 1.19 \text{Al}_{0.3}\text{Fe}_{0.9}\text{O}(\text{OH}) + 2.09 \text{H}_4\text{SiO}_4^\circ + 0.50 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 0.09 \text{Fe}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_2(\text{OH})_{0.05} + 3.22 \text{HCO}_3^-$

Para caracterizar de manera general la disponibilidad de nutrientes de los MPA_{Si} que componen al suelo, se han desarrollado algunos índices reportados, con los que es posible diagnosticar la capacidad de estos para soportar el desarrollo de organismos de la productividad primaria.

IPW (índice potencial de intemperización):

$$IPW = 100 * \left(\frac{CaO + Na_2O + K_2O + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O + TiO_2} \right)$$

PIW (índice de intemperización de Parker):

$$IPW = 100 * \left(\frac{2Na_2O}{0.35} + \frac{MgO}{0.9} + \frac{2K_2O}{0.25} + \frac{CaO}{0.7} \right)$$

CIA (índice de alteración química:

$$CIA = 100 * \left(\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right)$$

La interacción entre el manejo desarrollado por la actividad humana, las funciones y atributos del suelo, conducidos por la ingeniería practicada para el desarrollo sustentable de la productividad primaria, es propuesto como un manejo 4 M-Más: M_1 = Manejo, experiencia y capacitación, M_2 = Minerales, M_3 = Materia orgánica y M_4 = Microorganismos, y se pueden representar como la nutrición biodinámica de los organismos vivos, en la siguiente reacción incongruente del manejo sustentable:



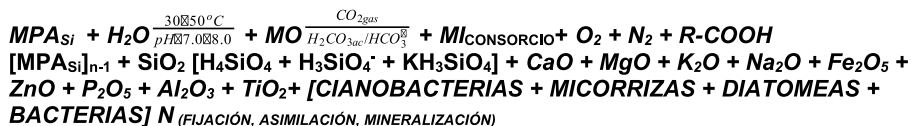
APORTES DEL MANEJO AGRÍCOLA 4M-Mas		
M₁= Manejo del Productor (Expertise-Capacitación)	M E J O R	Patrimonio - Suelo: Remineralización
M₂= Minerales Primarios Amorfos Ricos en Silicio (MPA_{Si})		Cosecha: Volumen Y Calidad
M₃= Materia Orgánica Funcional (Composta)		Independencia: Insumos (Químicos)
M₄= Microorganismos (Consortio Microbiano)		Resiliente: Cambio Climático Factores Abióticos Factores Bióticos
	M A Y O R	Desarrollo Agrícola: Sustentable, Evolución
		Desarrollo Humano

Con el análisis cuantitativo, cualitativo y el balance entre ellos, se diagnostica el IPPS, fundamentando cuánto es posible extraer y/o se debe reponer para el desarrollo sustentable y resiliente de la cadena alimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como modelo de estudio, se trabaja con la expresión de la siguiente ocurrencia de eventos biogeoquímicos:

Eventos biogeoquímicos en la disolución incongruente de los MPA_{Si} que integran al suelo:



La expresión enfatiza que la presencia en cantidad y disponibilidad de minerales primarios, MPA_{Si} –los cuales en promedio en un suelo productivo componen el 90% del total de minerales– es la base para el

inicio de la productividad primaria compuesta por OMIC y OF. Los MPA_{Si} se encuentran disponibles mayormente en las partículas sólidas con un diámetro entre 5 y 500 μm (arena y limo). Aunque la concentración de silicio (Si) es variable en cada uno de los más de 1,500 minerales descritos en la literatura, se puede considerar que aquellos que contienen entre 20 y 30% de Si en su composición química son adecuados para el desarrollo de la productividad primaria que demanda el desarrollo de la agricultura sustentable, además de que son fuente de Ca, Mg, K, Fe, Zn, Na, Cu, Mn, P, S. En general, un buen suelo agrícola debe tener en promedio 25% de Si, por lo que se establece que un suelo agrícola sustentable debe contener minerales ricos en Si.

Dentro de las herramientas modernas para el análisis y diagnóstico del patrimonio suelo, se encuentra la microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplada a microsonda analítica de rayos X, tanto de dispersión (EDS) como de fluorescencia (XRF). Esta permite observar las dimensiones, formas y agregados de las partículas sólidas y orgánicas del suelo o tejido, y cualitativa y cuantitativamente determinar su composición elemental. Un equipo representativo se muestra en la **figura 2**, el cual está integrado por un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS) marca Oxford modelo inca 250 y espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) acoplados a un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM-6390 LV LGS. El procedimiento para el análisis de las muestras de suelo se muestra en la **figura 3**.

El IPPS se genera matemáticamente por ecuaciones basadas en las relaciones entre funciones y atributos del suelo, tal como la que se muestra en la **figura 4**, mismas que son reguladas por la ocurrencia de factores bióticos y abióticos y sus variaciones estacionales y temporales que impactan en la composición química cuantitativa total de los MPA_{Si} que constituyen el suelo, C (orgánico y carbonatos), CaO, MgO, SiO_2 , K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , MnO. Comúnmente la disolución incongruente de los MPA_{Si} puede ser regulada por la acción de:

- Tamaño de las partículas de suelo (arcilla, limo, arena).

- Clima, radiación solar y temperatura.
- Agua (H_2O), lluvia y riego.
- Bióxido de carbono gaseoso y disuelto (H_2CO_3/CO_2), aportado por la atmósfera del suelo, sistema radicular, y el originado por la descomposición de los esquilmos agrícolas y/o materia orgánica (MO), el cual además produce ácidos húmicos ($R_{HA}COOH$).
- Nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) atmosférico, que generalmente se encuentran en una concentración del 75 y 21%, respectivamente, importantes para el flujo de energía y producción de proteínas en los organismos fotosintéticos y microbianos de la productividad primaria.
- Microorganismos, fotosintéticos y no fotosintéticos (cianobacterias, diatomeas, hongos micorrízicos y filamentosos, etc.).
- Variables fisicoquímicas de extractos acuosos del suelo, concentración de protones hidrógeno (pH), concentración de sales disueltas (C.E., μS) y potencial óxido-reducción (REDOX, mV).

RESULTADOS

Los datos característicos de composición total del suelo y desarrollo de productividad primaria, obtenidos de diferentes regiones agrícolas, con diferente productividad y condiciones de clima, se muestran en la **tabla 3**. Con ellos se realizan cálculos donde se consideran las relaciones moleculares entre los elementos calcio, magnesio, sodio y potasio como altamente sensibles a la intemperización, mientras que el hierro y silicio de mediana respuesta y el aluminio como de muy baja respuesta. Es importante destacar que los OF y los OMIC de la productividad primaria requieren de Si como un nutriente inexorablemente ligado a su reproducción, productividad y respuestas fisiológicas de resiliencia y evolución.

Una adecuada, eficiente y racional administración del patrimonio encontrado en los MPA_{Si} del suelo, mediante el monitoreo del IPPS permitirá mejorar la productividad primaria, para promover el desarrollo de la cadena alimentaria y consecuentemente el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras.

Del planteamiento anterior se deriva la cuantificación de los IPPS para la producción de maíz en condiciones de temporal en la región maicera del gran Valle Alto del Estado de México, que incluye, en el norte, los municipios de Temascalcingo y Acambay; al sur, Calimaya; al oriente los municipios de Jiquipilco, Temoaya y Otzolotepec, y al poniente, Villa Victoria y Villa de Allende. En la región existe una gran diversidad genética en los maíces criollos, con un rendimiento de grano que varía entre 2.5 a 10.0 ton ha⁻¹, por ello resulta importante cuantificar la respuesta a la aplicación de tecnología de manejo 4M-Mas como se describe antes.

Tabla 3. Índice de productividad primaria del suelo (IPPS) y composición mineral del suelo con actividad de organismos fotosintéticos y su relación con el pH de la solución acuosa (pH ~ 7.0), obtenida por suspensión durante 40 min y agitación eventual. El análisis se realizó con la técnica EDS-X. Los resultados se expresan en % de muestras secas.

Elemento 4.5-5.0		pH en la solución del suelo. (1:1)							
		5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	
Silicio	Si	13.49	14.16	16.26	18.38	19.71	19.51	20.67	20.81
Oxígeno	O	54.33	55.49	57.58	56.29	58.38	60.72	58.17	59.27
Aluminio	Al	10.45	10.40	10.15	9.22	6.65	6.87	6.68	5.56
Carbón	C	9.52	11.92	8.96	8.67	9.42	7.87	8.55	10.08
Calcio	Ca	0.88	0.73	0.56	0.86	0.79	0.48	0.79	1.13
Fósforo	P	0.36	0.36	0.22	0.17	0.12	0.08	0.07	0.08
Hierro	Fe	5.34	5.05	4.23	3.99	2.16	1.80	2.03	1.05
Magnesio	Mg	0.38	0.35	0.29	0.53	0.73	0.63	0.63	0.39
Potasio	K	0.38	0.34	0.59	0.68	1.11	1.17	1.40	0.97
Titanio	Ti	0.59	0.56	0.45	0.44	0.23	0.21	0.22	0.15
Sodio	Na	0.41	0.28	0.33	0.48	0.53	0.52	0.57	0.47
Silicio/Oxígeno	Si/O	0.25	0.26	0.28	0.33	0.34	0.32	0.36	0.35
Silicio/ Aluminio	Si/Al	1.29	1.36	1.60	1.99	2.96	2.83	3.09	3.74
Cabón/Silicio	C/Si	0.71	0.84	0.55	0.47	0.48	0.40	0.41	0.48
IPPS	%	1.39	0.82	1.55	4.38	10.36	9.70	13.56	10.10

Un IPPS de 40-50% se determinó como el mejor para una productividad agrícola sustentable.

Los productores agrícolas miembros de la Federación de Productores de Maíz del Estado de México (FPMEM), distribuidos en el gran Valle Alto, conociendo la importancia de incorporar tecnología y prácticas agrícolas para el manejo sustentable del suelo para mejorar la cadena productiva del maíz, a partir de una mayor producción de grano y forraje en calidad y cantidad, aplican un paquete tecnológico para el manejo del IPPS en una superficie mayor a 2,000 hectáreas, el cual consiste en aplicar en la siembra una remineralización de fondo integrada por materia orgánica funcional (400-800 kg ha⁻¹), MPA_{Si}-P (O4mas® 300-500 kg ha⁻¹), consorcio microbiano compuesto por: micorrizas y *azospirillum* y fermento de líquido ruminal de bovino (20 lts ha⁻¹), fertilización NPK (50 kg ha⁻¹).

El monitoreo con las herramientas MEB, EDS y XRF del paquete tecnológico establecido en el ciclo 2010 por los productores de maíz de la FPMEM para mejorar el IPPS nos muestra los siguientes resultados:

- Una buena germinación y desarrollo de plántula (**figura 5**).
- Colonización del suelo por una diversidad microbiana (**figura 6**).
- Disolución de las partículas del suelo, inducida por MO y la diversidad microbiana (**figura 6**).
- Colonización de la raíz por micorrizas (**figura 7**).
- Cuantificación de la composición mineral de las gotas de gutación en cultivo de trigo con manejo 4M-Mas (**figura 8**).
- Una mejor nutrición de la planta con adecuada distribución de nutrientes, estableciendo la importancia del Si los mecanismos fisiológicos y de protección del tejido foliar (**figuras 9 y 10**).
- Acumulación de fósforo, magnesio y potasio en escutelo de semillas de maíz (**figura 11**).

El desarrollo del cultivo presenta un buen porte, con tallos vigorosos y buena capacidad de almacenamiento de reservas (mayor diámetro); un área foliar robusta y erecta; buen desarrollo de mazorca, y baja incidencia de plagas.

Tabla 4. IPPS de suelos típicos del gran Valle Alto del Estado de México (región Atlacomulco) y de materia orgánica funcional empleado en el programa de mejoramiento del patrimonio suelo y remineralización del cultivo.

Elemento 1		Suelo				MO funcional	
		2	3	4	Normal	MPA _{Si} -P	
Carbón	C	4.69	5.66	8.08	9.30	17.08	12.92
Silicio	Si	25.28	24.52	28.35	25.11	12.65	5.23
Titanio	Ti	0.40	0.55	0.56	0.00	0.00	0.00
Aluminio	Al	6.77	6.82	7.42	6.09	3.38	2.17
Hierro	Fe	2.62	2.74	3.60	2.83	1.25	2.63
Magnesio	Mg	0.31	0.27	0.42	0.65	0.09	0.78
Calcio	Ca	1.03	1.30	1.75	1.05	4.52	6.69
Sodio	Na	0.77	1.06	0.97	0.88	0.95	0.41
Potasio	K	0.53	0.59	0.67	0.56	1.16	5.75
Fósforo	P			0.64		0.52	3.85
Oxígeno	O	55.11	54.56	53.91	54.25	51.16	44.63
Azufre	S					2.02	1.49
Nitrógeno	N	3.09	2.51			9.14	7.34
Zinc	Zn						1.74
Cloro	Cl		0.19				4.51
	pH	5.20	4.50	6.00	6.00	7.50	7.60
Redox	mV	259.00	328.00	301.00	287.00	205.00	166.00
C.E.	(μS)	203.00	200.00	376.00	286.00	>2000	>2000
IPPS	%	3.51	6.26	9.50	11.74	65.44	238.81

Un fundamento del desarrollo de la sustentabilidad, con base en la remineralización con minerales MPA_{Si}, es la técnica del entarquiamiento, que se practicó en la irrigación de cultivos de trigo, calabaza y lino en las riberas del río Nilo por los egipcios unos 5,000 años antes de nuestra era. Esta práctica permitió, además de irrigar, enriquecer al campo de cultivo con partículas de la corteza del suelo recientemente meteorizada e intemperizada, sobre el cual se desarrollan microorganismos como las cianobacterias y diatomeas, que enriquecían con

nitrógeno y materia orgánica, mejorando notablemente la fertilidad de los suelos. En México esta práctica se desarrolló desde 1910 bajo el concepto de cajas de agua, como una manera de retener y conducir el agua de lluvia. Algunos sitios realizaron esta práctica en regiones agrícolas como Navolato, Sinaloa, con el cultivo de arroz. Allí, año tras año irrigaban con aguas lodosas o chocolatosas obteniendo buenas producciones, las cuales se terminaron por el almacenamiento del agua rica en minerales en la presa “José López Portillo” en 1982. Actualmente, en estos suelos se cultiva maíz el cual tiene un sistema radicular profundo, pero aun así la producción de este importante cultivo está en decadencia. Otras regiones con aporte de MPA_{Si} a través de inundaciones inducidas o naturales están en Michoacán (La Piedad, riberas del lago de Cuitzeo, Zamora) y en Guanajuato (Pénjamo), por citar algunas.

Figura 1. Disolución de MPA_{Si}

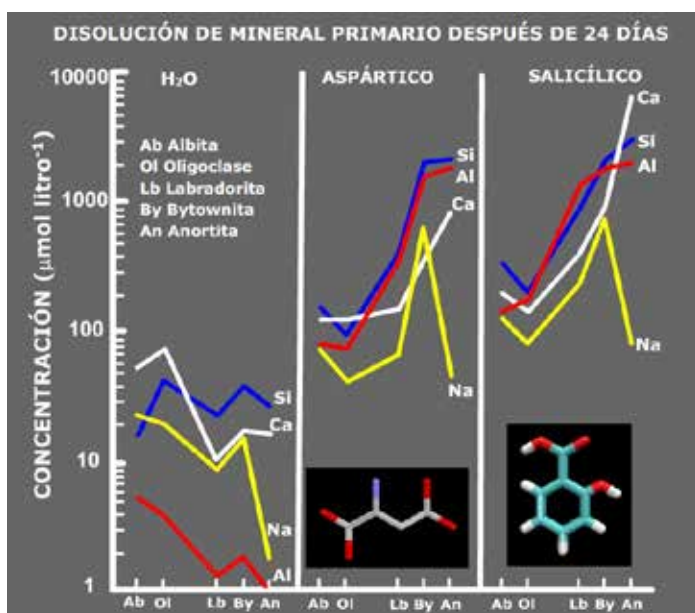


Figura 2. Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).



Figura 3. Procesamiento de muestras de suelo y análisis en SEM-EDS-XRF.

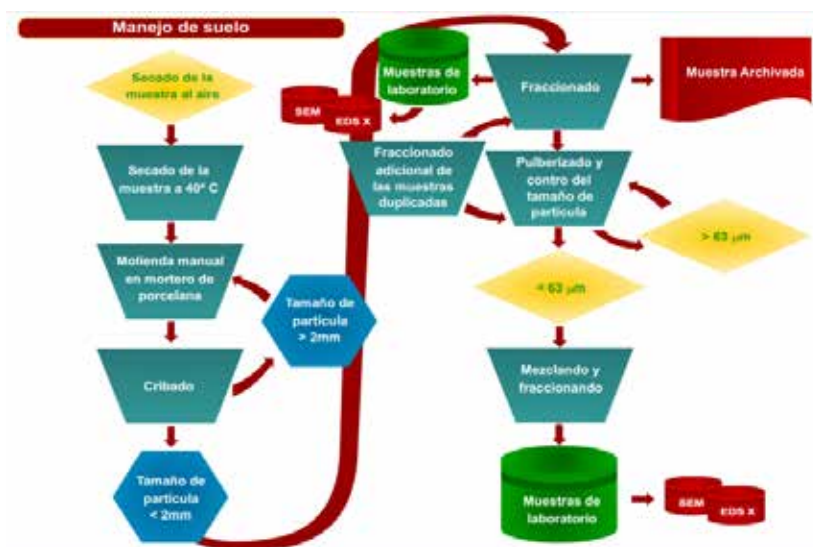


Figura 4. Relación de función entre funciones y atributos del suelo.

INDICE DE INTEMPERIZACIÓN DEL SUELO AGRÍCOLA Y SU RELACIÓN CON SiO_2 Y EL pH

$$\text{I.I. PARKER} = -22.3595 - 13.136 \cdot \text{SiO}_2 + 17.2769 \cdot \text{pH} + 1.2607 \cdot \text{SiO}_2^2 + 0.3172 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{pH} - 1.2079 \cdot \text{pH}^2$$

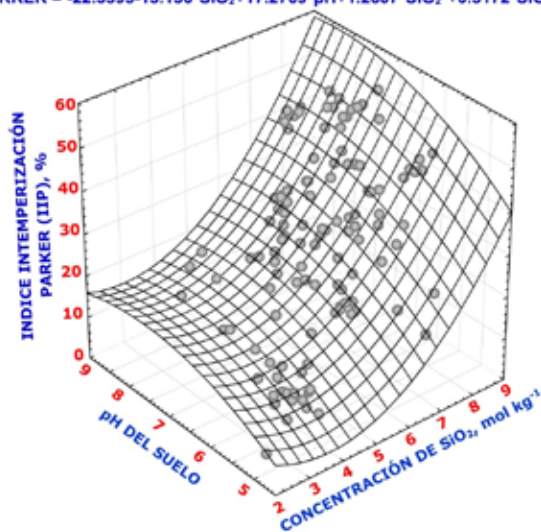


Figura 5. Desarrollo de plántula de maíz criollo.



Figura 6. Microorganismos del suelo y la disolución de minerales.

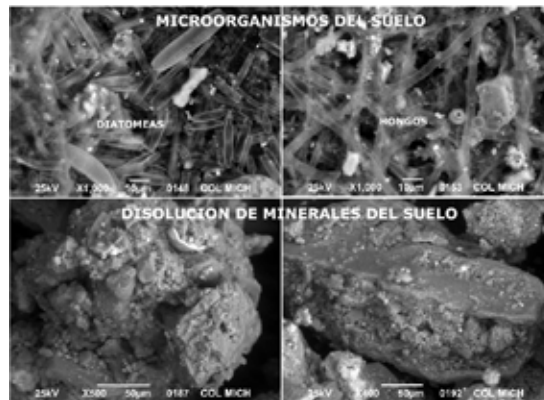


Figura 7. Micorrizas y minerales del suelo.

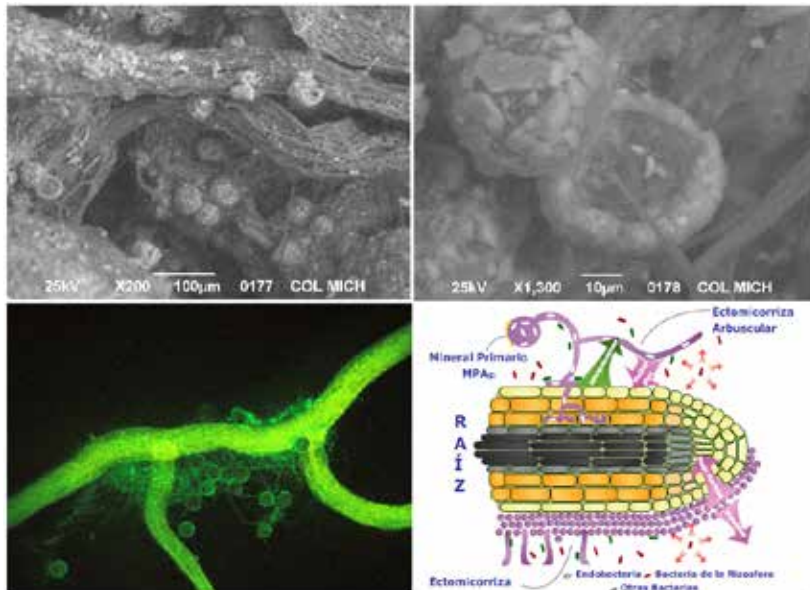
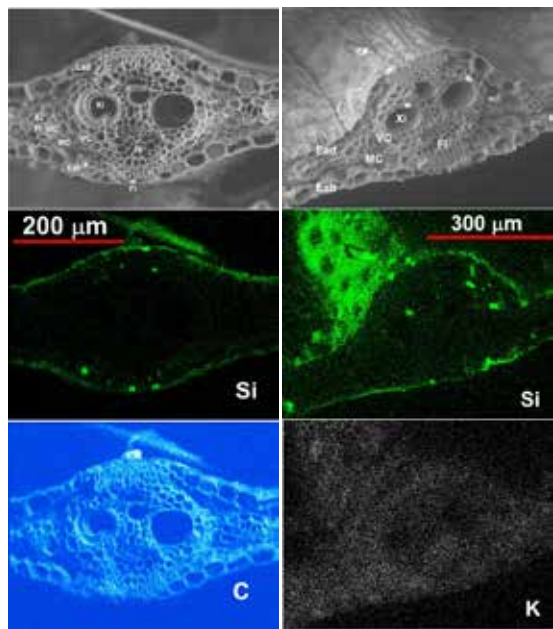


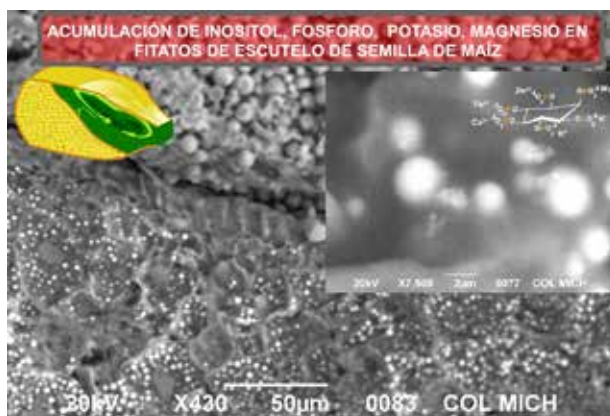
Figura 8. Cuantificación de la composición de las gotas de la gutación en cultivo de trigo bajo manejo 4M-Mas.



Figuras 9 y 10. El silicio presente en la epidermis de la hoja de maíz.



Figuras 11. Acumulación de fitatos en escutelo de semillas de maíz.



Planta criolla de maíz



SILICIO EN LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS

QUÍMICA DEL SILICIO

Silicio (Latín: *silex*, *silicis* pedernal), elemento químico no metálico; símbolo Si; número atómico 14; peso atómico 28.0855; volumen atómico $12.1 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$; radio atómico 110 pm (1 picómetro = 1×10^{-12} metros); radio covalente 111 pm; configuración electrónica $[\text{Ne}]3s^23p^2$; electrones (e^-) por nivel de energía 2, 8, 4; estados de oxidación -4, 4 (anfótero); densidad (293 °K) 2.33 g cm^{-3} ; estado físico en la naturaleza, sólido (no magnético); punto de fusión 1,414 °C; punto de ebullición 2,355 °C; calor de fusión $50.55 \text{ kJ mol}^{-1}$; calor de vaporización $384.22 \text{ kJ mol}^{-1}$; presión de vapor 4.77 Pa a 1683 °K; enlace covalente/ kJ mol^{-1} , Si – H 326, Si – C 301, Si – O 486, Si – F 582, Si – Cl 391, Si – Si 226. Un tetravalente metaloide, que es menos reactivo que su análogo químico el carbón.

Isótopo	^{28}Si	^{29}Si	^{30}Si	^{32}Si
Masa atómica	27.977	28.976	29.974	31.974
Abundancia natural %	92.23	4.67	3.10	0
Vida media	estable	estable	estable	650 años



Ácido silícico, un grupo de siete formas hidratadas de SiO_2 , con una fórmula general $[\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x}]_n$, que incluye a los siguientes ácidos silícicos: tetra, $\text{H}_2\text{Si}_4\text{O}_9$, meta-di, $\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, meta-tri, $\text{H}_4\text{Si}_3\text{O}_8$, meta, H_2SiO_3 , orto-tri, $\text{H}_8\text{Si}_3\text{O}_{10}$, orto-di, $\text{H}_6\text{Si}_2\text{O}_7$ y orto, H_4SiO_4 . La última fórmula se escribe como $\text{Si}(\text{OH})_4$. Ácidos silícicos y aniones silicatos se polimerizan por medio de la formación de múltiples uniones Si-O-Si. La estructura polisilica puede ser lineal o cíclica y no es uniforme en tamaño.

El silicio ocurre en la solución del suelo a 0.1-0.6 mol m⁻³, como $\text{Si}(\text{OH})_4$ (dos órdenes de magnitud más alto que los macronutrientes como fósforo $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$). Por otro lado, en el océano el silicio ocurre en concentraciones de 0.5 a 2.0 microM.

DIATOMEAS

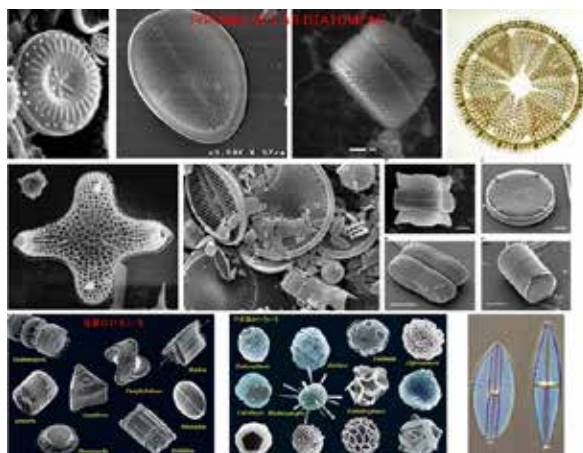
Silicio, el más abundante elemento sobre la corteza de la Tierra. Está ampliamente distribuido en los sistemas biológicos. El silicio tiene muchas funciones, que incluyen soporte y protección en organismos unicelulares y en plantas y animales superiores. No obstante su amplia ocurrencia y función, poco se conoce de los materiales biológicos, micro y macroscópicos, que contienen silicio y de los mecanismos metabólicos que los regulan y producen con precisión de nanoescala.

Por su abundancia y propiedades físicas, el silicio es ampliamente empleado como materia prima en semiconductores, vidrio, plásticos, cerámica, concreto, fibra óptica, aislantes, detergentes, cosméticos, resinas y como aditivo en alimentos.

Silica, SiO_2 -, una forma óxida de silicio, es producida anualmente por un diverso grupo de eucariotes.

En la naturaleza, biosilica es el silicio derivado biológicamente, producido por algunos procariotes y eucariotes. Es esencial para la construcción de estructuras arquitectónicas diversas, exquisitamente intrincadas, que son reguladas por metabolismos específicos, con respuesta al medio ambiente y disponibilidad de silicio.

La biosíntesis *in vivo* de biosilica a partir de silicio, inicia con la formación de silicio amorfo, el cual existe como siloxano $[\text{SiO}_2]_n$, en su forma simple, bajo condiciones fisiológicas moderadas; alrededor de pH neutro y bajas temperaturas entre 4-40 °C. Estas condiciones contrastan con la síntesis de silicio, geoquímica, industrial e *in vitro*: que es acompañada típicamente de altas temperaturas y extremas condiciones de pH y presión.



El silicio existe en el agua de mar como ácido silícico, Si(OH)_4 , del cual el 5% está presente como su anión dissociado, SiO(OH)_3^- . Son diversos los organismos que emplean el ácido silícico para formar varios tipos de estructuras, incluyendo esponjas, radiolarios, silicoflagelados y diatomeas. De estos, las más importantes son las diatomeas. Las diatomeas utilizan ácido silícico (específicamente Si(OH)_4) para formar su pared celular o frústula. La frústula está compuesta de silicio amorfo $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, el cual es referido como biosilica, silicio biogénico u ópalo biogénico. El silicio amorfo también puede ser formado por procesos inorgánicos, refiriéndose a él como silicio litogénico u ópalo litogénico. La mayoría del silicio litogénico tiene su origen en la Tierra. Las diatomeas –de las cuales se reconocen más de 200 géneros y se estima que son aproximadamente cien mil especies– son un grupo ampliamente disperso y pueden ser encontradas en los océanos, ríos, suelos y superficies húmedas. Todas ellas con diferente pared celular, que, bajo adecuada luz y nutrientes, tiene una relación nitrógeno silicio 1:1, llegándose a considerar que su evolución está muy relacionada con la disponibilidad de silicio. Por otro lado, las frústulas, caparazones o pared celular de las diatomeas, aparentemente requieren de menor energía (8%) que las producidas con otros elementos y esto potencialmente

proporciona energía para otros propósitos. Por otro lado, se propone que el silicio puede mejorar la asimilación de CO_2 al actuar sobre la enzima extracelular anhidrasa carbónica mejorando la conversión de HCO_3^- , abundante en el agua de mar, a CO_2 , que es menos abundante y requerido para la actividad fotosintética.

La asimilación de ácido silícico por diatomeas sigue la función de saturación de Michelis-Menten, aunque su V_{max} y la constante $K_{\text{Si(OH)}_4}$ a $\frac{1}{2}$ de saturación son altamente variables. La velocidad de asimilación varía entre 0.02 y 0.12 mmol Si(OH)_4 por hora y $K_{\text{Si(OH)}_4}$ varía entre 0.2 y 97 mmol m^{-3} . Se puede mencionar que existen evidencias de la ocurrencia de diversas enzimas transportadoras de ácido silícico a través de la pared celular; asimismo, se puede predecir que su transporte es activo. También se tienen evidencias de que el hierro y el zinc tienen influencia sobre la asimilación de ácido silícico.

Una vez en la célula, el ácido silícico se precipita y forma silicio amorfo sólo durante parte del ciclo de vida celular, justo antes de la división celular. Aunque de manera continua se observa producción de silicio amorfo cuando se sufre de estrés por falta de nutrientes mayores, hierro y luz. La producción global de silicio amorfo por las diatomeas es estimada de 1.6 a 2.1 mmol $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, siendo la producción total de 200-280 Tmol Si año⁻¹. ¿Cuál es el destino de todo ese silicio amorfo?

Ciclo global del silicio		Flujo global, 10^{14} g ácido silícico año ⁻¹
Fuentes	Ríos (especialmente trópicos)	1.57
	Acarreo por aire (eólico)	0.14
	Erosión del fondo marino (mayormente cerca de la tierra)	0.11
	Entrada por circulación hidrotérmica	0.05
	TOTAL	1.87
Demanda	Deposición en la costa de silicio biogénico	0.16
	Deposición oceánica de silicio biogénico	1.72
	TOTAL	1.88

II

NAN-O-FERT® BIOMA MICROBIANO PARA EL DESARROLLO PROGRESIVO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS



NAN-O-FERT® es un consorcio más de 10 especies de microorganismos que habitan y hacen sinergia con los tejidos de las plantas. Ellos

habitan en el suelo, principalmente a una profundidad de 5 a 10 cm, y forman una biodiversa y dinámica relación progresiva con las raíces de las plantas, constituyendo un biosistema llamado rizosfera, compuesto por más 95 millones de individuos por gramo de suelo (1.2 mg carbono g⁻¹ de suelo), que miden de 1 a 5 micras. De estos, la mayor composición es de bacterias (94%), actinomicetos (4.8%) y hongos (0.5%) que pueden aportar gran diversidad de genes activos para estimular el crecimiento vegetal y la capacidad de adaptación ante la ocurrencia de factores bióticos y abióticos.

NAN-O-FERT® es un bioma que sus especies microbianas pueden desarrollarse en armonía con las células y tejidos vegetales, tanto raíz (rizosfera) como en las hojas (filosfera). En ambos casos participan de manera complementaria en el metabolismo primario y secundario, e incrementan la efectividad en la acción de protección biótica y abiótica y el metabolismo REDOX (flujo de energía).

NAN-O-FERT® se aplica al suelo en una dosis de 60 litros por hectárea por ciclo agrícola, 20 litros antes de la siembra, 10 litros después de siembra como un repuesto, y para mantener la biodiversidad se aplican 30 litros sobre todo en los primeros 60 días de desarrollo. Las aplicaciones se pueden realizar en combinación con materia orgánica líquida y nutrientes.

NAN-O-FERT® se aplica en el recubrimiento de semillas para lograr una mejor expresión genética y de las reservas minerales y carbohidratos en la semilla. El bioma desde esta etapa también protegerá a las hojas, tallos, flores y frutos.

NAN-O-FERT® es un producto de la tecnología apropiada, por lo que, manteniendo las condiciones y servicios adecuados, es posible replicarlo.

NAN-O-FERT® no es tóxico para los humanos y animales, pero debe emplearse con precaución y, de tener contacto, lavarse y mantener el producto en un ambiente higiénico.

COMPONENTES DEL BIOMA MICROBIANO NAN-O-FERT®

Los microorganismos de NAN-O-FERT® están concentrados para su reproducción garantizando una capacidad formadora de colonias (UFC de 10^5 a 10^9 por mililitro de solución).

1. ***Azospirillum brasilense***: Fijadora de nitrógeno y promotora del crecimiento.
2. ***Beauveria bassiana***: Entomopatógeno capaz de parasitar insectos, insecticida biológico.
3. ***Bacillus subtilis***: Libera sustancias con actividad fungicida.
4. ***Bacillus thuringiensis***: Libera sustancias con actividad de insecticida y promotora del crecimiento.
5. ***Metarhizium anisopliae***: Entomopatógeno capaz de parasitar insectos.
6. ***Ectomicorrizas/endomicorrizas***: Asimilación y movilización de fósforo, promoción del crecimiento y mejora del rendimiento de cosecha.
7. ***Rhizobium sp.***: Bacteria simbiótica, fijadora de nitrógeno.
8. ***Trichoderma harzianum***: Control y supresión de patógenos, capaz de liberar sustancias antagonicas.
9. ***Consortio de 60 microorganismos que amplían y fortalecen el metabolismo primario y secundario (biodiversidad genética), MEPS***: Bacterias acidolácticas, proteobacterias α , β y γ , levaduras, microorganismos fotoautótrofos.
10. ***Consortio de microorganismos biogeo-bioelectroquímico***. Microorganismos con alta capacidad de liberar enzimas (catalizadores) para la hidrólisis de carbohidratos, proteínas, celulosa y lignina, y promover reacciones REDOX para el flujo de energía (electrones).

MULTIPLICACIÓN DE BIOMA MICROBIANO NAN-O-FERT®

Para activar la productividad del suelo, restaurando y activando procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos, es indispensable contar con una amplia biodiversidad del bioma microbiano del suelo, por lo que se recomienda aplicar al suelo de 60 a 100 litros por hectárea de bioma microbiano NAN-O-FERT®, el cual se puede multiplicar de la siguiente manera.

Para la reproducción se requiere:

Recipiente de plástico de 1,000 litros o bien contar con biofermentadores de acero inoxidable.

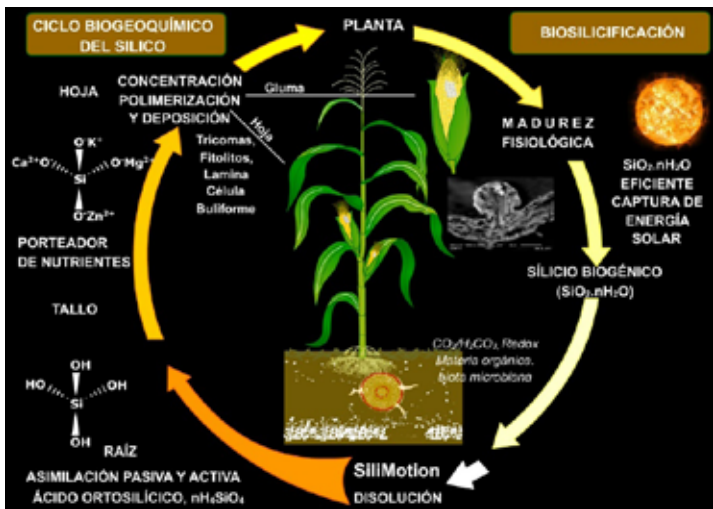


Para la multiplicación de bioma microbiano del suelo, NAN-O-FERT®, se requiere:

1. 100 litros de bioma NAN-O-FERT®, compuesto por más de 11 especies de microorganismos (bacterias, bacilos, levaduras, hongos).
2. 20 litros de melaza (previamente calentada al sol).
3. 5 kg de leche en polvo (sin antibióticos).
4. 5 litros de activador metabólico rico en fósforo, magnesio, calcio, potasio, zinc y hierro.
5. 5 kg de mineral O4mas®.
6. 900 litros de agua.
7. Recircular el líquido dos veces al día durante 30 minutos. A mayor frecuencia de recirculación, se obtendrá mayor multiplicación del bioma, evitando formar nata de grandes colonias.
8. La óptima multiplicación del bioma microbiano se logra con 120 horas de cultivo.
9. Mantenimiento del bioma microbiano se logra adicionando a 500 litros y leche en polvo y melaza (5 kilos de cada uno), y cada 15 días adicionar un litro de activador metabólico.

Los insumos 2, 3 y 4 se disuelven previamente en agua, 5 y 6 se pueden mezclar y colocar en un saco de tela tipo tergalina y dejar colgando dentro del tanque, siempre en contacto con el bioma microbiano NAN-O-FERT®.

Silimotion® Mineral primario para el desarrollo del proceso de biosilicificación en el agroecosistema



Composición química de Silimotion®

ELEMENTOS		g kg ⁻¹	Mol kg ⁻¹
Oxígeno	O	505	31.56
Silicio	Si	250*	8.90
Carbón	C	75	6.24
Aluminio	Al	50	1.85
Potasio	K	30	0.77
Sodio	Na	20	0.87
Hierro	Fe	20	0.36
Calcio	Ca	10	0.25
Magnesio	Mg	3	0.12

* 250 gramos de Si elemental equivalen a 535 gramos de SiO₂

FICHA TÉCNICA DE SILIMOTION® AGRÍCOLA

Silimotion® en la agricultura se emplea para:

- Establecer el proceso biogeoquímico de la biosilicificación, esencial para el desarrollo y crecimiento de cultivos agrícolas, optimizando la asimilación de radiación solar, asimilación y distribución de nutrientes minerales y aprovechamiento del agua.
- Activar procesos de adaptación abiótica y biótica, que mejoran el desarrollo saludable de los cultivos agrícolas. Los cultivos presentan escaso estado oxidado o bajo nivel de energía disponible para crecimiento y productividad.
- Desarrollar biodiversidad en el microbioma de la rizosfera.
- Mejorar procesos metabólicos:
 - Energía; captura y asimilación de radiación solar, eficiente acondicionamiento REDOX, por hidrólisis de agua y aportar: H^+ para transporte de energía y formación de CHO (biomasa), y liberar O_2 que demanda el proceso de respiración.
 - Carbono; fotosíntesis y respiración, excelente balance y mayor cantidad de biomasa en cosecha producida por kg de hoja.
 - Nitrógeno; captura de N_2 y mineralización, excelente balance biomasa-proteína.
 - Metabolismo primario, secundario y xenobiótico; bioprocesamiento de materia orgánica (alimento), producción de sustancias para la supresión de patógenos y degradación de contaminantes.

Silimotion® es un mineral primario amorfo, de origen volcánico-sedimentario, con silicio (Si) soluble y estable en la forma de ácido ortosilícico, H_4SiO_4 . Es un mineral soluble de forma inmediata y progresiva por procesos fisicoquímicos, biogeoquímicos y bioelectroquímicos, alcanzando a saturar el agua de riego con ácido ortosilícico a una concentración de 750 mg por litro (en promedio 8.0 mmol l^{-1}).

Silimotion® por su origen mineral contienen trazas de elementos benéficos: titanio (Ti), wolframio (W), cloro (Cl), manganeso (Mn), bario (Ba), estroncio (Sr), fósforo (P), zirconio (Zr), rubidio (Rb), azufre (S),

cromo (Cr), zinc (Zn), cobre (Cu), itrio (Y), níquel (Ni), cobalto (Co), galio (Ga).

Silimotion® aplicado regularmente al suelo y en el agua de riego, solo o en combinación con materia orgánica y nutrientes minerales, potencializa el crecimiento de manera sinérgica.

Silimotion® se recomienda aplicar en forma soluble, disolviendo 10 kilos en 200 litros de agua (50 gr l⁻¹) y esta solución aplicarla por hectárea. La fracción de sedimentos se aplican directamente al suelo para continuar su progresiva disolución. Para aplicaciones foliares se recomienda disolver 5 gr l⁻¹.

Silimotion® se aplica a cultivos de hortalizas y granos en la fertilización base en una dosis de 200 kg ha⁻¹, en la línea de siembra.

Silimotion® se aplica en forma sólida, directamente al suelo en el área de sombra de frutales, en una dosis de 5 kilos por árbol por ciclo agrícola.

El mineral **Silimotion**® es un material estable, inerte y ligeramente tóxico, no presenta ningún daño al contacto con la piel, pero se recomienda tenerlo fuera del alcance de los niños.

FICHA TÉCNICA DE SILIMOTION®

Silimotion® es un mineral primario amorfo, de origen volcánico –sedimentario, siendo el silicio (Si) y el carbono (C) los principales componentes solubles-. Forma química estable del silicio es el ácido ortosilícico (H₄SiO₄). **Silimotion**® es un producto que se degrada progresivamente; disponer en forma soluble el 80% en un periodo de 8-12 meses.

Composición química elemental del mineral Silimotion®, en su fracción total con una fórmula empírica de $\text{Si}_{3.8}\text{O}_{6.9}\text{Al}_{0.7}\text{C}_{0.39}\text{Na}_{0.08}\text{K}_{0.07}$ y soluble en agua.

Elemento %		Sólido total		Soluble	
		mol kg ⁻¹	g l ⁻¹	mmol l ⁻¹	
Oxígeno	O	55.32	6.9151	6.19	387.17
Silicio	Si	26.90	3.8306	1.55	55.23
Aluminio	Al	6.25	0.6952	0.00	
Carbón	C	1.17	0.3887	1.36	113.31
Sodio	Na	1.87	0.0814	0.20	8.52
POTASIO	K	2.73	0.0699	0.45	11.56
HIERRO	Fe	1.58	0.0564	0.26	4.69
NITRÓGENO	N	0.22	0.0463	0.53	37.79
CALCIO	Ca	0.73	0.0365	0.03	0.68
MAGNESIO	Mg	0.43	0.0351	0.02	0.86
AZUFRE	S	0.01	0.0006	0.03	0.78
pH		8.54		7.63	
C.E.	mS	10.54		19.41	
ORP	mV	147		165	

El Silimotion® es altamente soluble en la presencia de materia orgánica rica en radicales carboxilos, siendo un mineral adecuado para la nutrición de los cultivos agrícolas y sistemas biológicos que requieran de silicio soluble para su crecimiento. El Silimotion®, aplicado al suelo solo o en combinación con materia orgánica, restaura la cadena alimentaria del suelo, mejorando el desarrollo de la rizosfera y los procesos bio-geoquímicos, por lo que es posible lograr, si se aplica de manera temprana, mejoras en la resistencia y tolerancia de los cultivos a factores bióticos (patógenos e insectos del suelo y foliares) y abióticos (sequía, humedad, alta temperatura, alta radiación solar). El silicio se encuentra presente en estructuras de las hojas como los tricomas y fitolitos que protegen a la planta de alta temperatura y radiación solar; la aplicación de Silimotion® incrementa estas estructuras.

Para la efectiva aplicación del Silimotion®, se recomienda tener un análisis del suelo y conocer las demandas del cultivo en función principalmente del área foliar, potencial rendimiento, sanidad del predio y cosecha y prever la ocurrencia de fenómenos meteorológicos. Prácticamente todos cultivos presentan respuesta a Silimotion® recomendando aplicar una dosis de 300 kg ha⁻¹ para restaurar la cadena alimentaria del suelo y proveer las demandas del cultivo.

En cultivos como las gramíneas, trigo, cebada, maíz, sorgo, caña de azúcar, los requerimientos de silicio son en promedio de 300 kg ha⁻¹; para los cultivos de soya, frijol, alfalfa, la demanda es de 200 kg ha⁻¹; para árboles frutales en producción, aguacate, mango, cítricos, guayaba, cacao, la demanda potencial es de 500 g árbol⁻¹ por año; en frutillas, fresa, frambuesa, zarzamora, arándano, uva, la demanda es de 500 kg ha⁻¹ por año.

El mineral Silimotion® es un material estable, inerte y ligeramente tóxico, no presenta ningún daño al contacto con la piel, pero se recomienda tenerlo fuera del alcance de los niños.

O₄MAS®: MINERAL PRIMARIO PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA SUSTENTABLE

La extracción de minerales primarios del suelo por los cultivos agrícolas durante décadas ha repercutido en la disminución de oxígeno mineral, por lo cual se requiere de la remineralización y así restaurar poco a poco el suelo para incrementar la sanidad y productividad de las plantas.

Composición química elemental del mineral O4mas®.

Elemento		O4mas®
		mM kg ⁻¹
Energía, MJ kg ⁻¹		17.493
Oxígeno	O	25,825.77
Silicio	Si	8,145.23
Carbón	C	18,249.10
Aluminio	Al	2,606.41
Potasio	K	526.82
Sodio	Na	716.22
Hierro	Fe	229.94
Calcio	Ca	268.52
Magnesio	Mg	157.03

Titanio	Ti	37.78
Cloro	Cl	11.88
Manganeso	Mn	6.91
Fósforo	P	9.46
Zinc	Zn	0.58
Cobre	Cu	0.23
Azufre	S	0.64
PM, g mol ⁻¹		56.80

O4mas® se emplea para:

- Restaurar la capa arable de 10 cm del suelo, por medio de la remineralización y así revertir el proceso de erosión.
- Nutrir con oxígeno mineral, ya que la productividad del agroecosistema depende de la riqueza de oxígeno en el suelo.
- Promover el desarrollo de la biodiversidad del microbioma y raíces de la rizosfera.
- Mantener el balance de minerales en el suelo, para tener condiciones de flujo de electrones y así crear un estado de óxido-reducción que permita el intercambio de energía y nutrientes entre los componentes de la rizosfera.

O4mas® es un mineral primario que contiene macro y micronutrientes que, solo o en combinación con materia orgánica, potencializa el crecimiento, así como la cantidad y calidad de las cosechas, debido a que aumenta la disolución y movilización de nutrientes.

Se recomienda aplicar O4mas®, con base en el análisis de suelos, donde se sugiere la guía de aplicación anual, basados en el tipo de suelo.

Dosis en Kg Ha ⁻¹			
Cultivo	Ácido	Arcilloso	Franco Arenoso
Arroz	250	200	150
Maíz	300	250	200
Frijol	200	150	100
Caña de azúcar	300	250	200
Campos de golf	250	200	150

Agave	250	200	150
Nopal	200	150	100
Dosis en g árbol⁻¹			
Mango, g/árbol	500	500	500
Plátano, g/árbol	500	600	400
Guayaba, g/árbol	300	300	200
Aguacate, g/árbol	500	500	500

O4mas® se aplica en cultivos de hortalizas y granos en la línea de siembra. En frutales se utilizan de 100 a 600 gramos por árbol de acuerdo con la edad. Es un material estable, no presenta ningún daño al contacto con la piel.

Se recomienda hacer análisis de suelo antes de la aplicación de minerales y después de terminar el ciclo del cultivo para determinar el grado de restauración, y posterior guía de aplicación para el cultivo.

BIOGEO® ACTIVADOR MINERAL

El ACTIVADOR MINERAL BIOGEO® es un producto diseñado para inducir procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos que comúnmente ocurren en la naturaleza y que se expresan en sustancias orgánicas como azúcares, aminoácidos, proteínas, fenoles, flavonoides y carotenos, los cuales son activados a través de intercambio de energía mediada por electrones. El ACTIVADOR MINERAL BIOGEO® contiene principalmente minerales primarios ricos en silicio, calcio, magnesio, fósforo, hierro, azufre y zinc, en estado amorfo y ricos en alta densidad de electrones disponibles que son requeridos para la activación de sustancias orgánicas ricas en carbono y radicales del tipo ~COOH.

Composición química de sustancias orgánicas obtenidas
con la aplicación de ACTIVADOR MINERAL BIOGEO®.

pH			6.96
ORP	mV		-410.7
rH	reducido		6.90

C.E.	mS cm ⁻¹		76,000
S.D.	ppm		48,640
Elemento		%	mg l ⁻¹
Carbono	C orgánico	29.729	14,460.23
Oxígeno	O orgánico	29.498	14,347.99
Potasio	K	15.105	7,346.85
Cloro	Cl	10.067	4,896.54
Nitrógeno	N	6.415	3,120.35
Azufre	S	4.630	2,252.13
Sodio	Na	2.859	1,390.38
Calcio	Ca	0.740	359.84
Magnesio	Mg	0.325	158.15
Silicio	Si	0.309	150.34
Hierro	Fe	0.137	66.54
Fósforo	P	0.111	53.95
Aluminio	Al	0.075	36.71
Zinc	Zn	0.050	24.32
Manganeso	Mn	0.030	14.59
Cobre	Cu	0.020	9.73
Molibdeno	Mo	0.010	4.86

El **ACTIVADOR MINERAL BIOGEO®** contiene sustancias activadoras orgánicas de origen natural y los elementos son de origen mineral.

El **ACTIVADOR MINERAL BIOGEO®** se aplica a productos orgánicos de desecho como el estiércol de ganado vacuno, borrego, pollo y esquilmos agrícolas en una relación de 100 kg por metro cúbico de materia orgánica. Se aplica espolvoreado a cada capa de 15 cm. Las sustancias orgánicas obtenidas se pueden emplear en todos los estados de desarrollo generativo y vegetativo de los cultivos, sobre todo en las etapas iniciales de preparación del suelo, ya que las sustancias orgánicas actúan como disolventes de los minerales primarios del suelo, mejorando la solubilidad de los nutrientes. También mejoran la retención de humedad y la descompactación del suelo.

III

AGROECOSISTEMA MAÍZ CON TECNOLOGÍA APROPIADA (TA) PARA EL MANEJO DEL PATRIMONIO SUELO

En el cultivo de maíz es posible manejar los procesos biológicos involucrados en su productividad, ya que estos parecen tener una respuesta ortogenética, en la cual es posible la expresión y armonización de manera diferencial de los genes. La creciente producción por hectárea de grano, lograda en diferentes regiones agroecológicas es evidencia de la regulación de la biología del cultivo. En la región indicada como A en la figura, el crecimiento mantuvo una productividad de $1.58 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a lo largo de 23 años, logrando pasar de 10.73 a $34.04 \text{ ton ha}^{-1}$, un crecimiento superior a 200%. La respuesta es reproducible en otras dos regiones, siendo C la característica encontrada de Valles Altos de México. En este es posible esperar un crecimiento de la productividad de $2.12 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ constante en los últimos 6 años, pasando de 8.5 ton ha^{-1} en 2012 a 19.9 ton ha^{-1} en 2017, un crecimiento mayor al 130%. En tendencias de crecimiento, potencialmente ello es consecuencia del empleo de tecnología apropiada, por ejemplo, la disponibilidad de silicio en la solución del suelo y el efecto en la nutrición mineral y lumínica, los aportes del microbioma en la rizosfera, filosfera y endosfera, la inducción de la expresión génica en diferentes periodos del desarrollo,

germinación, floración femenina y masculina, desarrollo y crecimiento de grano. Las expresiones matemáticas antes referidas son:

$$\text{Ton ha}^{-1} = 0.9093 \cdot \text{año} - 1801.7891, r^2 = 0.9169, 2 \text{ msnm}, 37^\circ 20'$$

$$\text{Ton ha}^{-1} = 1.5767 \cdot \text{año} - 3148.4451, r^2 = 0.5607, 50 \text{ msnm}, 30^\circ 55'$$

$$\text{Ton ha}^{-1} = 2.1160 \cdot \text{año} - 4247.7653, r^2 = 0.9624, 1800\text{-}2000 \text{ msnm}, 20^\circ 09'$$

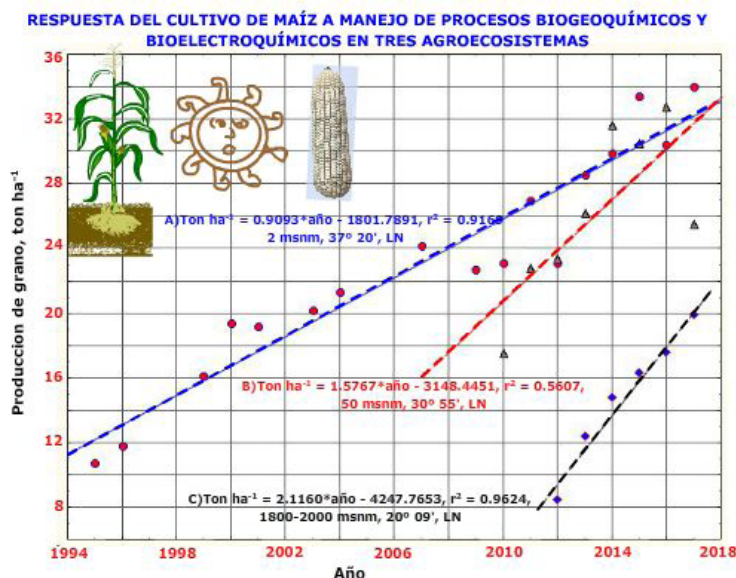
Esta respuesta debemos de diagnosticarla en agroecosistemas de activo desarrollo, ya que existen herramientas y capacidad científica en diferentes instituciones.

En evaluación preliminar se cuantificó la composición química de una cosecha de maíz, con buen desarrollo, encontrando que, en total de componentes con energía (CHO), se obtuvieron 42.59 ton ha⁻¹, que representan una captura de CO₂ de 39.63 ton ha⁻¹, de las cuales el 60% se integra al patrimonio suelo para mejorar sus funciones. Los resultados de asimilación química total se muestran en las siguientes tabla y figura:

Composición química de un cultivo de maíz con buen desarrollo en agroecosistema de la región del Valle del Mezquital, Hidalgo.

COSECHA Kg Ha ⁻¹		16,200	40,905	24,705
Elemento		Grano	Total	Esquilmo
Hidrógeno	H	1,186.65	2,945.13	1,758.48
Carbono	C	8,458.02	21,372.07	12,914.05
Oxígeno	O	7,567.02	18,277.40	10,710.38
Silicio	Si	1.66	799.63	797.97
Potasio	K	122.96	759.22	636.25
Cloro	Cl	18.50	304.50	286.00
Calcio	Ca	2.98	246.36	243.39
Magnesio	Mg	34.49	110.36	75.87
Fósforo	P	82.99	108.00	25.01
Azufre	S	25.39	58.07	32.68
Hierro	Fe	2.55	34.88	32.33
Sodio	Na	0.00	18.54	18.54
Zinc	Zn	1.08	6.30	5.23

Manganeso	Mn	0.00	3.96	3.96
Cobre	Cu	0.26	1.01	0.74
Otros		0.63	50.64	50.01



Para ilustrar el posible desarrollo de la producción de grano de maíz en Valles Altos de México, se analiza el comportamiento de la producción del estado de Hidalgo en el periodo 2012 a 2017, en el cual la producción promedio no supera las 3.22 ton ha⁻¹, pero es posible observar que algunos municipios mantienen un volumen mayor a 12 ton ha⁻¹, ello nos muestra la posibilidad de mejorar el agroecosistema. La muestra analizada corresponde a la información aportada por 83 diferentes municipios; se muestran los datos promedio en la siguiente tabla:

Cosecha de grano de maíz promedio de 83 municipios del estado de Hidalgo.

<http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/?platform=hootsuite>

Año	Total del estado		Producción de grano, Ton ha ⁻¹			
	ha	ton	Max.	Min.	Promedio	D.E.
2012	248,080.81	704,421.71	10.581	0.640	2.938	2.690
2013	246,796.48	644,627.83	9.925	0.649	2.663	2.108
2014	251,200.15	650,898.48	8.472	0.800	2.593	1.896
2015	235,377.20	714,239.06	9.739	0.840	2.940	2.329
2016	249,063.75	731,471.39	10.866	0.945	2.985	2.492
2017	236,737.04	731,734.06	12.037	0.962	3.223	2.863

La tecnología apropiada sustentable se ha difundido en el agroecosistema de Valles Altos como los del estado del Hidalgo, ello a partir del 2010 y esta tecnología se ha adaptado en función de las necesidades y disponibilidad de recursos. Como parte de proyecto, se han desarrollado diversas actividades de capacitación ante agricultores, algunas de las cuales se han difundido a través de las redes sociales, como las que se muestran enseguida:

CULTIVO ORGÁNICO DEL MAÍZ (ACTUALIZADO A MAYO, 2018)

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=4UhAtFl4gXg> (14,082 visualizaciones)

(2) https://www.youtube.com/watch?v=_A6Vf5W6JhI (11,963 visualizaciones)

VisMoTV, Ajacuba, Hidalgo, abril 2013,

BIOGEOQUÍMICA DEL SILICIO

(1) <https://www.youtube.com/watch?v=8CI405BJX8g> (8,344 visualizaciones)

(2) <https://www.youtube.com/watch?v=Qxsl330V05w> (5,579 visualizaciones)

Segundo simposio internacional, Por México Hablemos del Maíz:
Guadalajara, Jalisco, marzo 2013

LA RIZOSFERA DEL MAÍZ

https://www.youtube.com/watch?v=SCta1tnY_-c (13,873 visualizaciones)

Tercer simposio internacional, Por México Hablemos del Maíz:
Guadalajara, Jalisco, marzo 2014

Además de la capacitación presencial, se ha promovido la creación de infraestructura para el diagnóstico del agroecosistema, con equipo altamente preciso, como el instalado en 2010 en el Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) de El Colegio de Michoacán A.C. (<http://www.colmich.edu.mx/ladipa/>) y en 2015 en el Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnológica de Hidalgo (CENYTT) en la Fundación Hidalgo Produce A.C. (<https://www.facebook.com/Fundacion-Hidalgo-Produce-AC-1486080784993397/>)

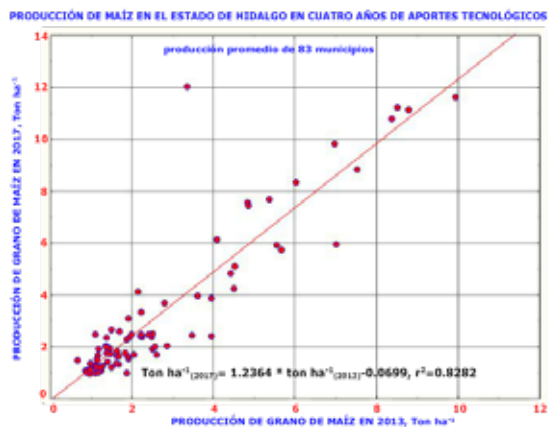
Con las herramientas anteriores, se ha promovido, de manera constante en últimos 17 años, la transferencia de tecnología apropiada. Por ello consideramos que es muy posible que el agroecosistema esté siendo mejorado, aunque de manera lenta. Para ilustrar esta posibilidad, se analizó la producción de grano por hectárea de 83 municipios del estado de Hidalgo y se graficó la distribución de datos (histograma) para cada año, 2012-2017. Los datos muestran una curva que evidencia una progresiva mejora de los rendimientos, que puede ser resultado de la adopción de la tecnología apropiada. Algunos de los municipios superan la producción promedio de 10 ton ha⁻¹.

La respuesta del agroecosistema es consistente con la mejora del patrimonio suelo y la supresión del bioma microbiano patógeno, más que aportes en la genética de los híbridos.



Al contrastar la producción del agroecosistema maíz en cada municipio en 2013 contra lo logrado en 2017, se aprecia una mejora consistente con un 24% de incremento en la producción de grano y esta puede ser impulsada a más mejoras con la adopción de tecnología apropiada para restaurar y mejorar las funciones del suelo (procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos), la remineralización y el microbioma.

El cultivo de maíz en Valles Altos con el empleo de tecnología apropiada.



PROTOCOLOS DE TA

Diagnóstico de las funciones del patrimonio suelo: Restaurar las funciones físicas, químicas y biológicas del patrimonio suelo, mediante la activación de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos, que demanda la producción progresiva y sustentable del agroecosistema maíz.

TECNOLOGÍA APROPIADA EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA PROGRESIVA BASADA EN CONOCIMIENTOS

Tecnología Apropriada

Microbioma

Aplicación de microbioma para el manejo de la biodiversidad en el agroecosistema. Selección, reproducción y manejo de bioma microbiano, rizosfera, filosfera y endosfera. Creación y mantenimiento de cepario y sistema de multiplicación de bioma microbiano.

Materia orgánica para aporte y restauración de las funciones del suelo

Sólida para manejo en el agroecosistema del patrimonio suelo y productividad de cultivos. Procesos de producción y manejo a partir de esquilmos, mediante bioproceso (microorganismos e invertebrados) y suplemento con minerales primarios.

Líquida, biomoléculas-lixiviado: Líquido orgánico a partir de esquilmos digeridos o frescos, con alto contenido de moléculas con diversidad de estructuras, fenol, flavonoide, carboxilo, amino, etc., precursores del metabolismo primario y secundario, proveedoras de energía metabólica (óxido-reducción) y sustancias con actividad en la inducción de resistencia. Para emplearse en la nutrición mineral (quelado de nutrientes), orgánica (carbono) y manejo de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos.

Biopreparados

Procesos con base en la formulación armonizada de diversos productos orgánicos (microbioma, materia orgánica líquida/sólida, suplemento orgánico/minerales), para la regulación y control de la nutrición mineral, el agobio biótico-abiótico, volumen y calidad de cosecha.

Agricultura de conservación

Manejo de esquimos agrícolas, con acción multipropósito para el manejo de las funciones del suelo.

Fenotipificación del agroecosistema y cultivo

Diagnóstico en campo y laboratorio del comportamiento del desarrollo del cultivo, a través de técnicas fenológicas, biológicas fisiológicas, químicas y meteorológicas.

Nutrición química y agroquímicos

Se diagnosticarán las prácticas de manejo de la nutrición y agobio bióticos.

PARTICIPANTES PROPUESTOS, DADO EL AVANCE MOSTRADO EN LA INNOVACIÓN

Participantes:

Agricultor Innovador que emplea Tecnología Apropriada en los procesos de producción de maíz

1. Tlaxcoapan, Hidalgo, Ing. Ángel Cruz García.
2. Agroproductores de Valles Altos, Raúl Rosas Andrés, copetes.2008@hotmail.com
3. Federación de Productores de Maíz del Estado de México, Everardo Lovera Gómez, federaciondeproductores@prodigy.net.mx
4. Progreso de Obregón, Hidalgo. Anwar Estrada, anwarestrada01@gmail.com
5. En Dorado, Culiacán, Sinaloa, Serafín Uriarte, serafinuriarte@hotmail.com
6. Cd. Obregón, Sonora, Gilberto Wendlandt Willys.
7. Fundación Tortilla de Maíz Mexicana, Rafael Mier.

INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN

1. UNAM, Instituto de Geología, Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Dra. Siebe Grabach Christina, siebe@unam.mx
2. ITSRLR, INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LOS REYES, Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, MC Santos Zepeda Guzmán, zebiol@hotmail.com (microbiología con especial participación en micorrizas /agronomía).
3. UIEPA, Universidad Interserrana del Estado de Puebla, Ahuacatlán, Agroindustrial, Biotecnología, Ing. Sergio Pérez, slandero@gmail.com (Tecnologías Apropriadas para el manejo agrícola /agronomía).
4. UAAAN, Horticultura, Dr. Adalberto Benavides, abenmen@gmail.com (fisiología y bioquímica vegetal/agronomía)
5. CHAPINGO, Dr. Gerardo Noriega Altamirano (Tecnología Apropriada, fisiología y nutrición vegetal/agronomía).
6. UAS, Agronomía, Dr. Martin Parra Delgado, martinparra2004@yahoo.es, aorganicusin@gmail.com (Tecnología Apropriada, manejo de suelos).
7. CINVESTAV, Irapuato, Dra. Mercedes G. López Pérez, mlopez@ira.cinvestav.mx (química de metabolitos secundarios e instrumentación analítica/química)
8. CINVESTAV, Irapuato, Dr. Víctor Olalde Portugal, victor.olalde@cinvestav.mx (relación microbioma del suelo-planta, micorrizas).
9. COLMICH, LADIPA, La Piedad, Michoacán, Dra. Ana Velia Coria Téllez, Laboratorio de Análisis y Diagnóstico del Patrimonio, LADIPA, (diagnóstico del patrimonio, instrumentación analítica, FTIR, RAMAN, SEM, DART-masas).
10. UPFIM, Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, director de carrera de Ingeniería en Agrotecnología, M.C. Alejandro Ventura Maza 738 72-4-11-74 Ext. 150 aventura@upfim.edu.mx (agricultura sustentable).

GOBIERNO

1. FIRA, Dirección General Adjunta de Coordinación de Regionales, Nemecio Manuel Monarrez Macías, nmmonarrez@fira.gob.mx
2. FIRA. Residente estatal Hidalgo, Ing. Juan Rosales Narváez, jrosales@fira.gob.mx, 7717133580.

3. FIRA, Ixmiquilpan, Jesús Meléndez, jmelendes@fira.gob.mx, 7597231375.
4. FIRA, Centro de Desarrollo Tecnológico Tezoyuca, Ing. Marco Antonio Guzmán Noguera, maguzman@fira.gob.mx

EMPRESAS

1. BIMBO, Gerente de administración y control del grupo BIMBO, Ing. Martín López Urquiza; gerente Administrador y Control del Grupo BIMBO
2. CIMMYT - MASAGRO, SAGARPA, <http://conservacion.cimmyt.org/es/maiz-valles-altos>, Ing. Fabricio Fernando García Ramírez, 5511747332.

REFERENCIAS

1. MANEJO DEL CULTIVO DE MAÍZ CON TECNOLOGÍA APROPIADA BASADA EN CONOCIMIENTOS
2. https://www.researchgate.net/publication/325428462_MANEJO_DEL_CULTIVO_DE_MAIZ_CON_TECNOLOGIA_APROPIADA_BASADA_EN_CONOCIMIENTOS
3. MANEJO SUSTENTABLE DEL PATRIMONIO SUELO EN EL CULTIVO DE MAÍZ
4. https://www.researchgate.net/publication/325428422_Manejo_sustentable_del_Patrimonio_Suelo_maiz
5. CARACTERIZACIÓN ELEMENTAL DE SEMILLA DE MAÍZ (ZEA MAYS SPP.) NATIVO (MEXICANO) https://www.researchgate.net/publication/325479262_CARACTERIZACION_ELEMENTAL_DE_SEMILLA_DE_MAIZ_ZEA_MAYS_SPP_NATIVO_MEXICANO

ANEXOS

Base de datos de la producción en agroecosistemas del estado de Hidalgo

Producción de maíz en el estado de Hidalgo, México. Posible respuesta a la tecnología apropiada. Datos modificados a partir de <http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/?platform=hootsuite>

Distrito	Municipio	Producción, Ton ha ⁻¹					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
Huejutla	Atlapexco	1.599	1.659	1.528	1.480	1.312	1.341
Huejutla	Huautla	1.812	1.890	1.665	1.519	1.440	1.555
Huejutla	Huazalingo	1.534	1.264	1.258	1.229	0.945	1.289
Huejutla	Huejutla de Reyes	1.787	1.619	1.602	1.598	1.640	1.634
Huejutla	Jaltocán	1.544	1.072	1.197	1.339	1.390	1.315
Huejutla	San Felipe Orizatlán	1.562	1.150	1.493	1.604	1.656	1.665
Huejutla	Xochiatipan	1.630	1.597	1.533	1.431	1.530	1.361
Huejutla	Yahualica	1.671	1.480	1.606	1.343	1.290	1.221
Huichapan	Chapantongo	1.452	1.350	1.224	2.585	2.280	2.060
Huichapan	Chapulhuacán	1.280	1.857	2.154	1.937	1.761	2.314
Huichapan	Huichapan	2.363	2.218	2.200	4.556	3.260	3.348
Huichapan	Jacala de Ledezma	1.916	2.469	1.391	1.753	1.706	2.380
Huichapan	La Misión	1.856	2.851	1.200	1.830	1.860	2.040
Huichapan	Nicolás Flores	0.980	2.244	2.495	2.395	2.196	2.400
Huichapan	Nopala de Villagrán	1.412	1.356	1.262	3.889	2.492	2.360
Huichapan	Pacula	2.054	2.498	2.356	2.216	1.932	1.932
Huichapan	Pisaflores	1.354	1.912	2.300	1.630	1.750	2.350
Huichapan	Tecoautla	2.874	2.787	3.022	3.785	3.606	3.689
Huichapan	Zimapan	0.968	1.623	1.975	1.903	1.789	1.825
Mixquiahuala	Actopan	9.500	2.130	3.099	3.210	3.011	4.137
Mixquiahuala	Ajacuba	4.466	4.078	3.530	4.156	5.955	6.150
Mixquiahuala	Alfajayucan	6.349	4.510	4.639	5.553	5.252	5.110
Mixquiahuala	Atitalaquia	5.597	5.656	5.789	6.355	6.060	5.747

Mixquiahuala	Atotonilco de Tula	1.364	1.907	2.779	3.863	3.067	3.105
Mixquiahuala	Cardonal	1.179	7.000	1.188	1.647	1.522	5.970
Mixquiahuala	Chilcuautila	7.510	4.827	5.891	7.788	7.467	7.591
Mixquiahuala	El Arenal	9.000	3.454	2.527	2.646	2.429	2.470
Mixquiahuala	Francisco I. Madero	9.400	9.925	8.379	9.281	10.866	11.631
Mixquiahuala	Ixmiquilpan	6.774	4.850	5.480	5.478	5.552	7.445
Mixquiahuala	Mixquiahuala de Juárez	10.581	8.504	8.472	9.739	9.954	11.247
Mixquiahuala	Progreso de Obregón	9.600	8.774	8.140	8.849	10.090	11.142
Mixquiahuala	San Salvador	9.750	7.504	5.829	7.517	8.695	8.862
Mixquiahuala	Santiago de Anaya	10.400	3.925	2.414	2.524	2.332	2.411
Mixquiahuala	Tasquillo	2.112	5.362	5.365	4.246	5.224	7.704
Mixquiahuala	Tepeji del Río de Ocampo	4.309	3.597	3.901	6.418	3.396	3.981
Mixquiahuala	Tepetitlán	4.830	3.938	4.455	6.692	3.891	3.881
Mixquiahuala	Tetepango	3.783	3.342	3.065	3.489	8.674	12.037
Mixquiahuala	Tezontepec de Aldama	9.279	8.371	8.399	9.638	9.735	10.821
Mixquiahuala	Tlahuelilpan	7.047	6.967	6.192	7.844	7.678	9.835
Mixquiahuala	Tlaxcoapan	6.235	6.016	5.220	6.612	8.808	8.346
Mixquiahuala	Tula de Allende	6.429	5.528	6.100	7.864	5.847	5.938
Pachuca	Almoleya	2.185	2.485	2.788	2.618	2.735	2.503
Pachuca	Apan	2.324	2.391	2.338	2.000	2.211	2.472
Pachuca	Atotonilco El Grande	1.720	1.661	1.929	1.573	1.639	1.662
Pachuca	Emiliano Zapata	2.100	2.200	2.214	1.920	2.133	2.435
Pachuca	Epazoyucan	2.289	1.879	2.255	3.100	2.001	1.657
Pachuca	Huasca de Ocampo	2.020	1.811	2.039	1.734	1.700	1.787
Pachuca	Mineral de La Reforma	2.116	4.413	4.017	4.743	5.551	4.846
Pachuca	Mineral del Chico	1.071	1.061	1.015	1.113	1.214	1.311
Pachuca	Mineral del Monte	0.640	0.850	0.900	0.910	0.950	1.100
Pachuca	Omitlán de Juárez	0.880	1.080	1.150	1.100	1.200	1.000
Pachuca	Pachuca de Soto	1.248	0.872	1.451	0.900	1.150	1.040
Pachuca	San Agustín Tlaxiaca	1.400	1.084	1.221	1.029	1.079	2.500
Pachuca	Tepeapulco	2.547	2.543	2.129	2.227	2.249	2.030
Pachuca	Tizayuca	1.200	2.042	2.041	1.997	1.454	1.714
Pachuca	Tlanalapa	1.500	1.171	2.810	1.945	2.116	1.920

Pachuca	Tolcayuca	1.278	1.853	1.580	1.235	1.632	1.000
Pachuca	Villa de Tezontepec	1.452	1.439	1.537	1.570	2.428	1.953
Pachuca	Zapotlán de Juárez	1.292	1.398	1.779	1.988	1.756	1.985
Pachuca	Zempoala	1.532	0.649	1.914	1.602	2.539	1.496
Tulancingo	Acatlán	3.119	1.484	2.372	3.060	2.990	2.685
Tulancingo	Acaxochitlán	2.032	1.364	1.739	2.050	1.849	1.764
Tulancingo	Agua Blanca de Iturbide	1.516	1.130	1.233	1.445	1.625	1.514
Tulancingo	Cuautepec de Hinojosa	1.688	1.442	1.575	2.094	2.216	1.970
Tulancingo	Huehuetla	0.931	0.949	1.100	1.186	1.013	1.138
Tulancingo	Metepec	2.282	1.351	1.812	2.135	2.171	2.032
Tulancingo	San Bartolo Tutotepec	0.864	1.100	0.958	1.106	1.087	1.233
Tulancingo	Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero	1.372	1.456	1.374	1.963	1.957	1.736
Tulancingo	Singuilucan	1.900	2.600	1.500	1.600	1.800	1.700
Tulancingo	Tenango de Doria	1.000	1.161	1.054	1.105	0.972	1.110
Tulancingo	Tulancingo de Bravo	1.482	1.981	1.741	1.965	2.509	2.475
Zacualtipán	Calnali	1.148	1.145	1.077	1.162	1.263	1.275
Zacualtipán	Eloxochitlán	1.660	2.209	2.010	2.331	2.440	2.478
Zacualtipán	Juárez Hidalgo	1.004	0.955	0.800	0.840	0.970	0.962
Zacualtipán	Lolotla	1.385	1.219	1.238	1.014	1.308	1.100
Zacualtipán	Metztitlán	3.755	4.481	3.828	4.155	4.232	4.270
Zacualtipán	Molango de Escamilla	1.225	1.175	1.040	1.055	1.119	1.038
Zacualtipán	San Agustín Metzquititlán	1.999	1.690	2.439	2.903	2.775	2.601
Zacualtipán	Tepehuacán de Guerrero	1.352	1.203	1.202	1.147	1.134	1.244
Zacualtipán	Tiangustengo	1.425	1.126	1.250	1.157	1.182	1.200
Zacualtipán	Tlahuiltepa	1.658	1.393	1.558	1.409	1.355	1.438
Zacualtipán	Tlanchinol	1.448	1.224	1.296	1.128	1.249	1.213
Zacualtipán	Xochicoatlán	1.134	0.968	1.068	1.080	1.088	1.119
Zacualtipán	Zacualtipán de Ángeles	1.463	0.969	1.107	1.120	1.336	1.384

Rendimiento ton ha⁻¹ de la producción de grano de maíz en el estado de Sinaloa,
México, según distrito y municipio.

<http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/?platform=hootsuite>

Distrito	Municipio	2013	2014	2015	2016	2017
Culiacán	Badiraguato	1.331	1.950	2.222	2.206	0.849
Culiacán	Culiacán	8.371	8.172	9.668	10.912	10.405
Culiacán	Mocorito	7.233	8.608	9.130	9.055	8.274
Culiacán	Navolato	10.272	10.291	10.409	10.555	10.937
Guamúchil	Angostura	8.254	10.176	10.243	10.913	11.295
Guamúchil	Guasave	7.500	10.681	9.946	10.736	11.462
Guamúchil	Mocorito	3.790	1.777	5.902	6.587	11.661
Guamúchil	Navolato	10.698	10.700	10.338	10.535	10.887
Guamúchil	Salvador Alvarado	7.273	10.082	9.153	10.910	11.462
Guasave	Guasave	9.139	10.625	10.416	10.426	11.218
Guasave	Sinaloa	8.429	7.978	9.096	10.371	9.768
La Cruz	Cosalá	2.442	2.130	3.479	9.732	3.170
La Cruz	Culiacán	6.891	10.840	9.750	10.815	11.151
La Cruz	Elota	9.444	8.262	10.029	10.419	11.207
La Cruz	San Ignacio	3.868	5.687	6.116	7.537	4.616
Los Mochis	Ahome	9.170	11.338	10.684	11.085	11.727
Los Mochis	Choix	1.000	2.531	0.700	1.500	1.890
Los Mochis	El Fuerte	9.300	10.957	9.557	11.080	9.612
Los Mochis	Guasave	10.073	11.200	12.133	11.970	11.666
Los Mochis	Sinaloa	10.000	11.250	12.031	11.810	11.688
Mazatlán	Concordia	1.144	1.319	2.436	7.674	8.426
Mazatlán	Escuinapa	3.019	7.324	4.756	2.633	1.948
Mazatlán	Mazatlán	7.812	7.802	8.334	8.109	10.856
Mazatlán	Rosario	0.964	2.130	1.619	5.072	2.144
Producción	Máxima	10.698	11.338	12.133	11.970	11.727
	Mínima	0.964	1.319	0.700	1.500	0.849
	Promedio	6.559	7.659	7.839	8.860	8.680
	Desv. estándar	3.368	3.652	3.486	3.109	3.843
Superficie	Hectáreas	426,856.4	381,291.3	540,654.5	608,619.0	574,274.8
Cosecha	Toneladas	3,627,777.5	3,686,274.4	5,380,042.4	6,430,676.9	6,167,095.9
Rendimiento	Ton ha ⁻¹	8.499	9.668	9.951	10.566	10.739

MANEJO DEL CULTIVO DE MAÍZ CON TECNOLOGÍA APROPIADA BASADA EN CONOCIMIENTOS

El objetivo es generar conocimiento y validar protocolo de manejo junio-julio 2018: Proyecto de investigación aplicada, innovación y desarrollo tecnológico en la agricultura sustentable, tecnología apropiada, cultivo de maíz, manejo de agua, suelo, planta, técnicas analíticas de microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de fluorescencia de rayos X, técnicas básicas de química, microbiología y fenotipificación. El resultado establecerá la dirección para una productividad sustentable, progresiva y resiliente, con el empleo de tecnología apropiada, que apoye el desarrollo de mínimos de bienestar, alimentación, salud, organización, economía.

En conocimiento de la planta del maíz se ha desarrollado desde hace 10,000 años, teniendo periodos con mucho auge hace 5,000 años por la cultura Olmeca, antes de nuestra era, según evidencias tales como figuras de jade; personaje con atuendo en la cabeza exhibiendo una mazorca y seis mazorcas estilizadas. Ya en nuestro tiempo, en los años 200, 1000 y 1400, el conocimiento lo generaron los habitantes de las culturas Maya, Teotihuacana y Azteca, y para 1850 y 1920 en México y

Estados Unidos se establecen las bases del manejo del cultivo de manera intensiva.

La evolución progresiva del cultivo es respuesta a su capacidad ortogénica, que le confiere una amplia adaptación agroecológica, como lo demuestra el rendimiento reportado en 1820 con 2 ton ha⁻¹ y para 2017 alcanzar un rendimiento de 34 ton ha⁻¹. Esto se debe al amplio repertorio de ~32,000 genes y transposones, distribuidos en 10 cromosomas, compuestos por 2.3 billones de nucleótidos con que cuenta la planta. Estos se han logrado expresar a través del intercambio genético vía polen, la respuesta inmune o resistencia sistémica inducida (mediada por ácido jasmónico, peróxido de hidrógeno y etileno) y adquirida (mediada por ácido salicílico, silicio). A ello le sumamos la respuesta extremadamente variable ante las variaciones del medio ambiente (radiación solar, temperatura, agua) y prácticas de manejo (manejo de suelo, fertilización). Ello ha permitido a la planta mostrar una gran diversidad de expresiones fenológicas que se han catalogado en 25 razas, clasificadas según caracteres fenológicos de la planta, expresión de la flor masculina (espiga) y la mazorca, así como el comportamiento fisiológico, genético y citológico. Los genes se expresan con gran dinamismo en las etapas de formación y crecimiento del embrión y desarrollo de escutelo, en la germinación, el crecimiento del meristemo apical y el desarrollo de los nudos. Durante el desarrollo de estas etapas ocurre también la expresión diferencial de genes, que significan oportunidades de manejo de la productividad del cultivo.

El proceso productivo de la planta de maíz es acumulativo, donde la función de todos los tejidos tiene una meta, la reproducción y multiplicación a través de la semilla. Ello significa que a partir de una semilla con un peso promedio de 0.35 g, compuesta por embrión, escutelo, endospermo, aleurona y pericarpio, es posible acumular en ~100 días de desarrollo 1,200 gramos de biomasa, en la cual se encuentran 700 semillas, diferentes tejidos, tres tipos de tallos, tres tipos de hoja y tres tipos de raíz. El comportamiento productivo depende de la respuesta a

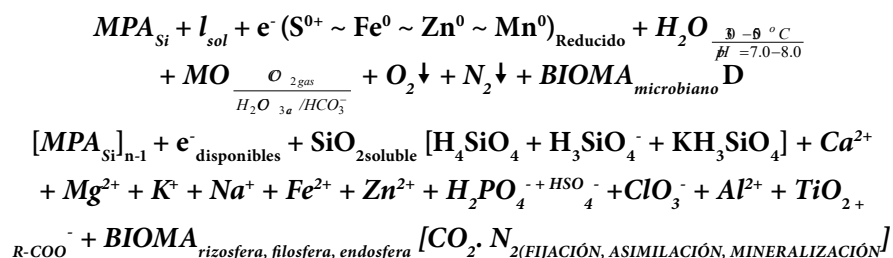
diversas variables, clima, agua, suelo, materia orgánica, etc., pero estas variaciones tienen en común, para interactuar con la planta, el proceso de óxido-reducción, definido como la capacidad de aceptar energía mediada por electrones (proceso de reducción), así como la capacidad ceder energía mediada por electrones (proceso de oxidación). A través de este proceso oxidación-reducción (REDOX) se mueve y almacena energía y se da respuesta a factores bióticos y abióticos, ya que cada molécula que compone la planta está sujeta a REDOX. Es importante, para que ocurra REDOX en los tejidos de la planta, contar con agua y radiación solar, para que ocurra la reacción: $\text{H}_2\text{O} + \lambda \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2$. Posterior a esta se requiere de minerales transportadores de electrones, P, S, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn. Con estos elementos inicia la captura del CO_2 del ambiente y su conversión en moléculas que se acumulan y distribuyen para producir biomasa, como son los carbohidratos. Para esta parte se demanda de proteínas, por lo que se requiere nitrógeno. La energía capturada y almacenada en un día es posible emplearla para el crecimiento o para adaptarse y asimilar agua y nutrientes, por lo que la disponibilidad y oportunidad de estos últimos definirán el crecimiento que se acumulará y cuánto se dedicará a la reproducción.



Para la armonización de la productividad creciente y productiva del cultivo del maíz, con base en la experiencia y conocimiento científico, se establece protocolo de manejo, a partir de las funciones biogeoquímicas y bioelectroquímicas del suelo, continuando con la germinación/emergencia, crecimiento y cosecha, destacando para cada etapa de desarrollo las oportunidades del empleo de tecnología apropiada para la mayor captura de luz (nutrición lumínica), CO₂ (nutrición carbónica) y su conversión en biomasa, con la mayor eficiencia del uso de agua.

Para la eficiencia productiva, la planta de maíz cuenta con un bioma microbiano aliado que aporta y amplía diversidad de genes que favorecen la nutrición mineral, desarrollo e inmunidad. Este bioma puede desarrollarse en el entorno de la raíz (rizosfera), en la canopia en la superficie de las hojas (filosfera) y en el interior de los tejidos (endosfera). El bioma microbiano se encuentra presente en promedio de 1.2 mg C /0.5 g N o bien ~90 x10⁶ individuos por gramo de suelo sano y sin disturbio; del total de ellos aproximadamente el 5% es potencialmente patógeno y el 50% se puede cultivar. Actualmente, mediante técnicas moleculares, es posible conocer a estos microbiomas y entender su comportamiento y cómo se relacionan con las plantas. Se conoce que ellos tienen dificultad para relacionarse con las plantas cuando están solos, siendo útiles y efectivos en grupo (consorcio), encontrando típicamente en la rizosfera de maíz 4 filo (*phylum*); actinobacteria, bacteroidetes, firmicutes, proteobacteria, 19 familias, 24 géneros y 45 especies, que destacan la importancia de la alianza planta-microbioma. Esto sin mencionar a los actinomicetos, hongos, levaduras, algas y virus. Se observa altamente probable que la domesticación del maíz contó con el apoyo del microbioma nativo y que parte de este aún acompaña a la planta en suelos con nulo o escaso disturbio. Los agentes químicos empleados indiscriminadamente han sido la principal causa de la pérdida de esta alianza.

El protocolo del manejo sustentable del cultivo maíz se basa en las relaciones biogeoquímicas y bioelectroquímicas que ocurren en un suelo sano, que se expresan en la siguiente ecuación y que es posible gestionar de manera controlada, a través de tecnología apropiada;



MPA_{Si} , son los más de 3,000 minerales primarios amorfos que se encuentran formando el suelo, los cuales tienen una composición base de O(50%), Si(26%), Al(5%), Fe(5%), Ti(0.25%); el resto (~13.75%) lo componen, Ca, Mg, Zn, P, etc.

X^0 , son elementos minerales ricos en electrones (e^{-}), por lo tanto, en estado químico reducido.

MO, Materia orgánica, rica en estructuras CHO, que contienen energía disponible para su empleo en procesos metabólicos.

$[MPA_{Si}]_{n-1}$, indica que el mineral primario se disuelve de manera incongruente, a través de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos y por la erosión, química, hídrica y ambiental.

$BIOMA_{microbiano}$, es la amplia biodiversidad del bioma microbiano que se encuentra viviendo en el suelo y que aporta un gran número de procesos metabólicos, muchos de los cuales muestran alianza con la planta, formando la rizosfera, filofera y endosfera.

$SiO_{2soluble}$, el silicio soluble y disponible para la planta, se encuentra en la forma de ácido ortosilícico $[H_4SiO_4]$.

El protocolo sustentable del cultivo del maíz atiende el manejo progresivo del patrimonio suelo, tomando en cuenta los siguientes parámetros, de un suelo sano de alta productividad:

Parámetros funcionales del patrimonio suelo, para
un proceso productivo y sustentable.

FÍSICOS	QUÍMICOS	BIOLÓGICOS
Materia orgánica, 5%	Materia orgánica, O/C ≥ 1	Carbón en BIOMA _{microbiano}
Textura, MPA _{ss} 42%, mineral secundario 3%	pH, 6.5-7.5	Captura de N _{2gas} , CO ₂ , mineralización de N en BIOMA _{microbiano}
Profundidad, 45 cm	Conductividad Eléctrica (CE), 500-900 mS cm ⁻¹	Biomasa total de BIOMA _{microbiano}
Estructura, MO/(arena + limo)	Potencial Óxido-Reducción 50-150 mV	Respiración de raíz (O ₂ /CO ₂)
Aireación, O ₂ , N ₂ , CO ₂ (25%)	Velocidad del ciclo biogeoquímico de nutrientes (Si, C, N, Fe, H, O, P, K, Mg, Na, Ca), Horas, días, años	Suelo-raíz- BIOMA _{microbiano} , emisión de CO ₂ ↑ (~25 kg ha ⁻¹ d ⁻¹ , respiración) y demanda de O ₂ ↓
Agua, retención y volumen, (25%)	Disolución y disponibilidad de nutrientes para establecer la cadena WEB	Actividad de enzimas hidrolíticas: peroxidasa, catalasa, proteasa, amilasa, fosfatasa, celulasa y enzimas REDOX: hidrogenasa
Densidad aparente, 1.4 g cm ⁻³ , 4000 ton ha ⁻¹	Disponibilidad de N mineralizado (N _{min}) N ₂ + N _{org} = NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻	Biodiversidad BIOMA _{microbiano} , aporte de genes y procesos metabólicos: fijadores entomopatógenos, promotores del crecimiento, inducción de inmunidad
Mineralogía de arcilla, (O ₅₅ Si ₂₅ Fe ₅ Al ₅ (MgCaK) ₅ C ₇)	Concentración y disponibilidad de nutrientes para organismos fotosintéticos y BIOMA _{microbiano}	Evolución y desarrollo del proceso de biosilicificación (cuerpos SiO ₂ .nH ₂ O)
Color	Silicio total 600-800 ton ha ⁻¹ y disponible en los sólidos disueltos, 250 kg ha ⁻¹ ,	Evolución y desarrollo del proceso de biocalcificación (CaCO ₃ , Oxalato de Ca)
Consistencia	Reducción, Fe ⁰ , Zn ⁰ , S ⁰	Biominales (Fitatos-P-K-Mg-Fe-Zn)
Velocidad de difusión, O ₂ , CO ₂ , N ₂ , tamaño de poros	Carbón orgánico total, RCOOH,	Bacterias fotoautótrofas (cianobacterias), fijadoras de nitrógeno atmosférico
Distribución del tamaño de partículas	Presencia de H ₂ O ₂ y CH ₃ COOH	Diatomeas
Estabilidad de agregados	Fósforo disponible y total	Micorrizas
Infiltración, lixiviación	Aluminio disponible y total	Cuerpos de silicio

Disolución	Disolución incongruente de MPA_{Si} y gases $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3$	Exudados, (Sideróforos), RCOOH , químicos-actividad
------------	---	--

A través de la fenotipificación física (fenología y arquitectura de la planta), química (composición mineral del agroecosistema) y biológica (estructura de los tejidos y su fisiología) de la planta y cultivo, se realiza el diagnóstico del protocolo de manejo propuesto. Para ello se diseña y crea un laboratorio en el cual se emplean técnicas de la espectrometría de rayos X, difracción (EDS) y fluorescencia (XRF), así como microscopía electrónica microanalítica de barrido (MEBA), complementado con técnicas de seguimiento metabólico (metabolómica), fisicoquímicas (seguimiento de procesos REDOX). Al mismo tiempo se realiza el diagnóstico de la composición y funcionalidad de las diversas técnicas apropiadas que se aplican para la inducción de la productividad sustentable. El equipo que se empleara para el diagnóstico se muestra en la siguiente imagen y está disponible en el Centro Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología de Hidalgo (CENITT) en la Fundación Hidalgo Produce A.C. (<https://www.facebook.com/Fundacion-Hidalgo-Produce-AC-1486080784993397/>).



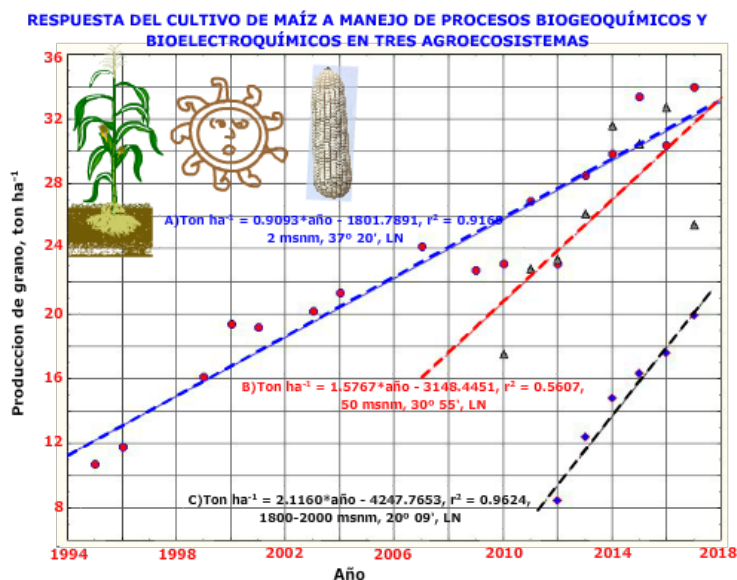
La fenotipificación en campo se realiza en plantas establecidas en parcelas comerciales en las cuales se practica la tecnología apropiada. En promedio, 10 plantas se cosechan y diseccionan el mismo día, las mediciones deben cuantificar la arquitectura y fenología de la planta, dando seguimiento a la expresión productiva de los diferentes tejidos, y diagnosticar los requerimientos nutricionales y de manejo para una agricultura sustentable y progresiva basada en conocimientos. Evaluaciones preliminares se han realizado en diferentes ciclos estableciendo un protocolo típico, que se ilustra en las siguientes figuras:



El manejo del cultivo se realiza siguiendo el protocolo, con el empleo recursos económicos, herramientas, técnicas, cuidado y seguimiento de los productores. La superficie cultivada ya cuenta con manejo previo por varios años y la tecnología apropiada que se emplea es preparada por el mismo productor en instalaciones creadas para ese propósito. La tecnología apropiada que aplica es MO sólida y líquida (biomoléculas-lixiviado) y reproducción de bioma microbiano útil, siguiendo protocolos establecidos para ese fin.

AVANCES DE INVESTIGACIÓN

El seguimiento y diagnóstico del cultivo y tecnología apropiada muestra que, en la región de Valles Altos, en Tlaxcoapan, Hidalgo, es posible realizar una agricultura sustentable y progresiva. La respuesta observada en los últimos 6 años es similar a la vista en otras regiones agroecológicas adecuadas para el cultivo de maíz. Esta respuesta es debida al amplio repertorio de genes activos y de transposones, ya que cualquier mejora en el agroecosistema, inducida o natural, propicia una respuesta del cultivo que es posible mantener progresivamente. Es vital el cómo conducir y mantener las respuestas de productividad y realizar actividades de generación pertinente de conocimientos. En la siguiente figura se ilustra la respuesta ortogénica en la producción de grano del cultivo de maíz en tres regiones agroecológicas:



En la figura anterior se muestra la productividad en tres sistemas agroecológicos. A continuación se muestra la interpretación matemática

de la productividad de cada una, siendo la mejor respuesta productiva “C”, con una productividad anual de 2.1160 ton ha⁻¹ año⁻¹; asimismo, se muestra que potencialmente existe una productividad, que aún no se explora, como consecuencia del empleo de tecnología apropiada, por ejemplo la disponibilidad de silicio en la solución del suelo y el efecto en la nutrición mineral y lumínica, y la inducción de la expresión génica en diferentes periodos, germinación, floración femenina y masculina, desarrollo y crecimiento de grano.

$$A) \text{Ton ha}^{-1} = 0.9093 * \text{año} - 1801.7891, r^2 = 0.9169, 2 \text{ msnm}, 37^{\circ} 20'$$

$$B) \text{Ton ha}^{-1} = 1.5767 * \text{año} - 3148.4451, r^2 = 0.5607, 50 \text{ msnm}, 30^{\circ} 55'$$

$$C) \text{Ton ha}^{-1} = 2.1160 * \text{año} - 4247.7653, r^2 = 0.9624, 1800-2000 \text{ msnm}, 20^{\circ} 09'$$

La composición química total de la fracción sólida del suelo a 20 cm de profundidad, en la región agroecológica “C”, se cuantificó por técnicas de espectrometría EDS-XRF. Asimismo, se realizó la extracción por 24 horas de sólidos disueltos en extracto saturado, empleando agua desionizada como disolvente. Otros elementos presentes en la fracción sólida también fueron cuantificados, así como la distribución del tamaño de partículas. Tanto en la fracción sólida como en extracto de pasta saturada se evaluaron parámetros fisicoquímicos. El resultado promedio de los suelos se muestra en la siguiente tabla.

Composición química promedio de 10 muestras del patrimonio suelo a 20 cm de profundidad, en la región agroecológica “C”, en donde se desarrolló el cultivo del ciclo PV 2018.

Patrimonio Suelo		Fracción sólida		Extracto saturado		
Elemento		%	Ton ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	mM l ⁻¹
Carbón	C	9.46	246.42	23.76	815.82	9.653
Oxígeno	O	49.42	1,289.45	39.83	1,381.77	12.147
Sodio	Na	0.66	17.21	16.80	593.32	3.565

Magnesio	Mg	1.03	27.07	1.00	37.91	0.201
Aluminio	Al	7.52	196.26	0.37	10.24	0.068
Silicio	Si	23.72	618.66	3.74	127.44	0.651
Fósforo	P	0.09	2.39	0.74	24.23	0.117
Azufre	S	0.03	0.81	3.94	138.07	0.600
Cloro	Cl	0.03	0.82	8.03	293.66	1.105
Potasio	K	1.15	29.88	1.61	51.27	0.201
Calcio	Ca	1.73	45.09	1.45	52.17	0.177
Titanio	Ti	0.59	15.39			
Manganeso	Mn	0.09	2.46			
Hierro	Fe	4.79	125.46			
Cobre	Cu	0.00	0.11			
Zinc	Zn	0.01	0.25			
pH		7.74		6.45		
ORP	mV	95.50		166.61		
rH	rH	25.34		25.12		
EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	878.30		762.50		
EC Abs.	$\mu\text{S cm}^{-1}$	901.50		671.10		
TDS	ppm	439.30		381.00		
SD	ppm	562.11		488.00		
M.O.	%	3.16				
CIC	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	32.01				
AS	%	53.48				
IASS	%	18.85				
R [CO ₃ ²⁻]	Ton ha ⁻¹	7.28				
Patrimonio	Ton ha ⁻¹	2609.25		1.28		

ORP, potencial REDOX; IASS, Índice agrícola de sustentabilidad del suelo.

Los resultados observados muestran que el patrimonio suelo cumple con requisitos para una productividad sustentable y que esta debe ser validada con la respuesta productiva y sustentable del cultivo ya establecido.

La asimilación total de nutrientes se cuantificó en planta con excelente desarrollo a madurez fisiológica, como respuesta al manejo con tecnología apropiada del agroecosistema “C”. Ello durante el ciclo PV 2017, en la región agroecológica del Valle del Mezquital. El secado de la planta entera se realizó a temperatura ambiente y posteriormente se separaron los tejidos y se terminó el secado en secadora con aire caliente por 30 minutos a 60 °C. Los tejidos de la planta se fraccionaron con la finalidad de observar la acumulación diferencial de nutrientes. Estos fueron mazorca (pedúnculo, hojas, olote, grano), hoja (lamina, nervadura), tallo, nudo y entrenudo (corteza y médula). Separados y secos, los tejidos se pesaron y molieron a un tamaño de partícula de 20 mm y se procesaron para su análisis en espectroscopía de rayos X (EDS-XRF). Los pesos y resultados del análisis se muestran en la siguiente tabla:

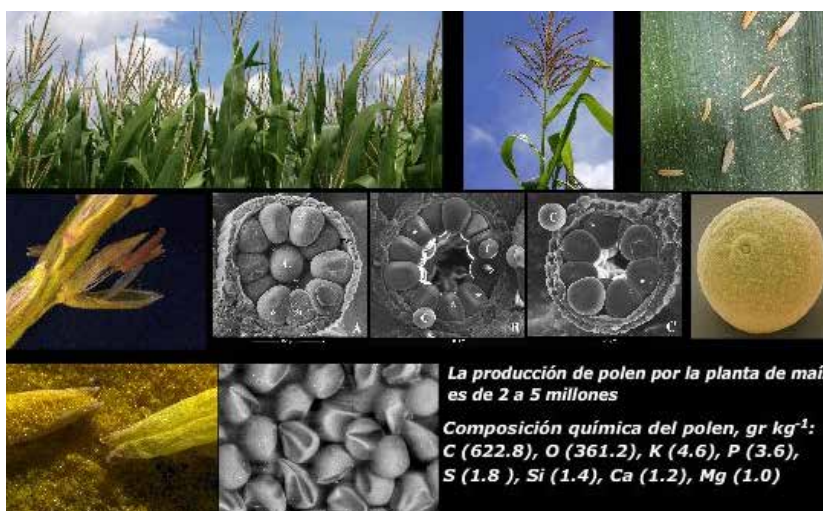
Composición químico elemental de planta de maíz, cultivada en la región agroecológica del Valle del Mezquital, Hidalgo. El análisis se realizó con técnicas de espectroscopía de rayos X (EDS-XRF) en el laboratorio el Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica de Hidalgo, de la Fundación Hidalgo Produce A.C., Queró Edgar, 2017.

	Mazorca				Hoja		Tallo			Raiz**	Total
Tejido	Grano	Olote	Tallo	Hoja	Ner*	Lámina	Médula ¹	Médula ²	Corteza	Raíz	
g planta ⁻¹	360.0	35.0	10.0	90.0	24.0	110.0	30.0	60.0	140.0	50.0	909.0
Asimilación g planta ⁻¹											
Carbono	188.0	18.3	5.3	47.0	12.4	53.3	16.2	31.9	75.3	27.1	474.9
Oxígeno	168.2	16.1	4.3	40.3	10.6	46.6	12.7	26.1	60.0	21.2	406.2
Extracción total de nutrientes, mg planta ⁻¹											
Silicio	36.9	79.4	60.0	1,571.1	952.7	12,019.2	192.8	254.0	1,994.1	609.3	17,769.6
Potasio	2,732.5	853.6	459.0	2,252.4	289.6	1,163.2	888.1	2,275.3	4,796.8	1,160.9	16,871.5
Cloro	411.1	220.1	181.8	819.9	19.6	98.3	564.3	1,335.2	2,567.7	548.5	6,766.6
Calcio	66.2	6.0	23.6	317.2	313.4	2,767.5	317.8	407.5	792.5	463.2	5,474.7
Magnesio	766.5	13.9	13.1	164.9	0.0	449.8	223.5	282.7	425.1	113.0	2,452.5
Fósforo	1,844.3	34.4	12.9	48.6	16.3	219.5	38.9	31.6	89.9	63.6	2,400.0
Azufre	564.2	21.6	8.2	51.1	30.4	335.4	43.9	34.5	75.6	125.5	1,290.4
Aluminio	11.4	15.5	11.5	70.2	21.0	401.6	24.4	30.8	134.7	160.3	881.4

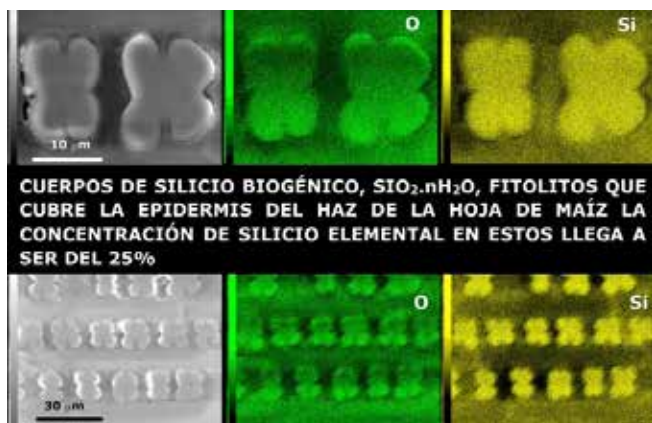
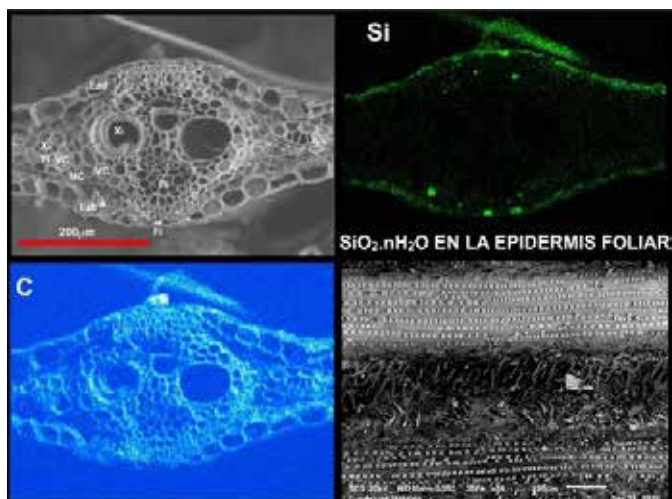
Hierro	56.7	20.1	6.2	50.9	20.0	279.1	26.7	28.0	124.7	162.8	775.1
Sodio				10.7	4.4	56.3	33.2	38.3	69.2	199.8	412.0
Zinc	23.9	7.0	4.6	13.3	4.2	30.6	26.6	6.8	15.6	7.5	140.1
Manganeso		0.8	0.4	8.3	6.6	50.5	3.1	3.7	9.0	5.6	87.9
Titanio			0.6	5.5	1.9	38.9			12.7	20.1	79.7
Wolfranio		3.9	2.4	6.8	1.4	10.5		4.5	20.3	3.7	53.5
Estroncio			0.4	2.2	2.4	18.2	2.3	3.1	6.7	3.9	39.2
Bromo			0.4	1.8			1.7	5.9	8.1	2.1	20.0
Cobre	5.8	0.9	0.5	2.0	0.5	3.4	1.9	1.8	2.5	3.0	22.4
Cromo		1.4	0.0	2.7	0.8				4.0	1.7	10.5
Rubidio	2.7	0.6	0.3	1.3		1.5	0.5		2.7	1.4	10.9
Níquel		0.7	0.2		0.5	2.8		1.6		2.3	8.2
Zirconio						3.9				1.5	5.4
Cobalto		0.7	0.2						4.2		5.1
Vanadio						4.3					4.3
Neodimio					2.7						2.7
Rodio			0.2			1.8	0.4				2.3
Terbio					1.7						1.7
Bismuto					0.4						0.4

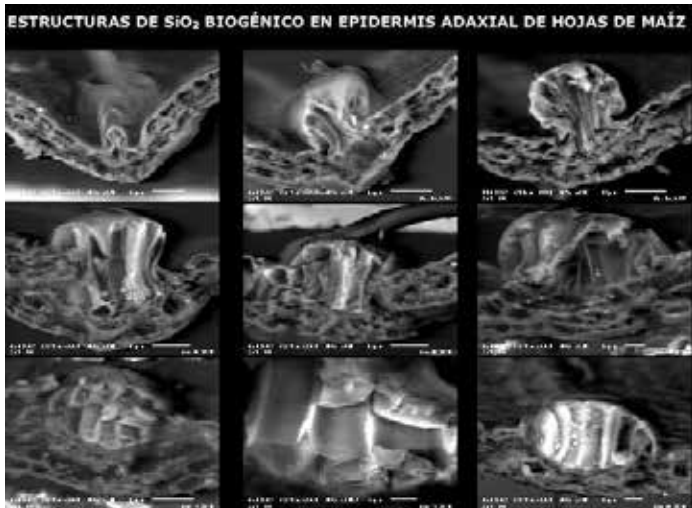
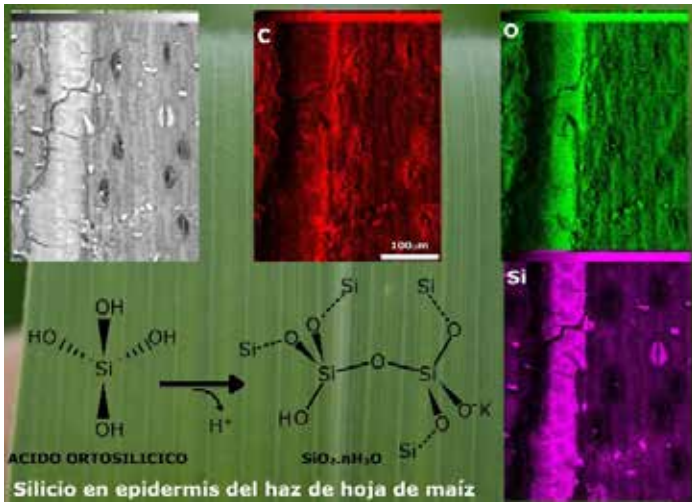
NER* es la médula principal de la hoja, médula¹ y médula² corresponden al tejido del nudo y entrenudo respectivamente, raíz**, esta es el 50% del total de desarrollo.

A estos datos se debe adicionar la extracción de los pistilos y el polen. Se estimó una producción de 2 gr de polen por espiga y la extracción de nutrientes cuantificada en mg con la misma técnica EDS-XRF, fue de: 1,244.35 (C), 722.70 (O), 9.15 (K), 7.30 (P), 5.45 (Al), 3.55 (S), 2.80 (Si), 2.45 (Ca), 1.93 (Mg), 1.87 (Cl). En la siguiente figura se muestra la evaluación de los granos de polen:

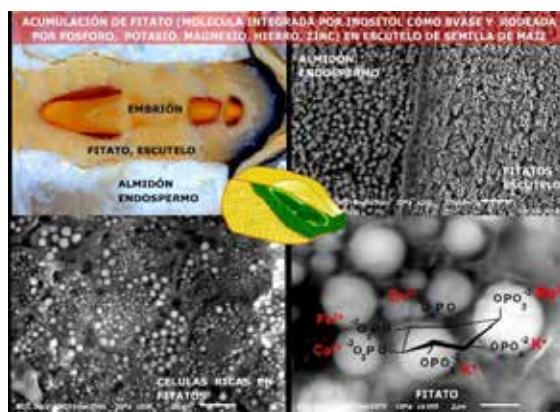


En los tejidos se realizó seguimiento a la acumulación de selectiva de nutrientes, a través de MEBA-EDS. Como ejemplo, se muestra la acumulación de silicio en la epidermis de la hoja, en diferentes estructuras, fitolitos, tricomas, células buliformes y estructuras sin forma definida que componen láminas de recubrimiento. La formación de estas estructuras muy posiblemente se debe a la ocurrencia del proceso biogeoquímico de biosilicificación en el continuo suelo-planta, que es promovido por la práctica de tecnología apropiada. El comportamiento mencionado se muestra en las siguientes figuras:





Otra secuencia que se ha realizado es la acumulación de fitatos (partículas esféricas compuestas por inositol, fósforo, potasio, magnesio, azufre, hierro, zinc y calcio). Este comportamiento se muestra en las siguientes figuras:



En las observaciones se encontró una muy alta correlación del tamaño del escutelo con la productividad de grano, y parece ser una respuesta a la disponibilidad de silicio, fósforo y *BIOMA_{microbiano}*.

TECNOLOGÍA APROPIADA

La tecnología apropiada que maneja el protocolo para el desarrollo de la agricultura sustentable y progresiva es adaptable a disponibilidad de insumos y a las condiciones socioeconómicas y agroecológicas. De manera sucinta se describe en los siguientes párrafos:

1. Diagnóstico de los componentes del agroecosistema; análisis de la composición química elemental del suelo, agua, bioma microbiano y planta. Para la realización de esta actividad se cuenta con laboratorio del Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica (CENITT) en el estado de Hidalgo. Este cuenta con equipo para la preparación de muestras (tamizadora, secadora, molino, prensa) y equipo para el análisis morfológico y elemental, empleando microscopía electrónica de barrido (MEBA), y espectrometría de rayos X (dispersión y fluorescencia), para el análisis de la composición químico elemental de microgramos a gramos. También, equipo básico para la cuantificación de parámetros fisicoquímicos y microbiología. Las muestras vegetales se colectan y transportan frescas al laboratorio, en un tiempo no mayor a 180 minutos. En promedio se muestrean 10 plantas por área de evaluación. En campo se realiza la fenotipificación morfológica y arquitectura de planta. En promedio, se requiere contar con tres parcelas con la aplicación de la tecnología apropiada diseñada previamente. El suelo se muestrea a una profundidad de 0-5, 5-15 y 16-30 cm. Se recomiendan 3 muestreos en la parcela de evaluación, mínimo tomar 5 submuestras, mezclarlas para obtener una de 500 gramos, para su análisis por la técnica MEBA-EDS-XRF. Para el seguimiento de la rizosfera, se realiza muestreo en una columna de 0-150 cm.
2. Materia orgánica líquida (biomoléculas-lixiviado orgánico). Este producto se emplea como herramienta para la disolución incongruente de 700 kg ha^{-1} por ciclo agrícola, de minerales primarios del suelo (Si, O, Ca, Mg, K, N, etc.), en la capa arable de 30 cm, así como mejorar la cantidad de materia orgánica e incrementar la diversidad de moléculas, con potencial empleo en el metabolismo secundario y primario del bioma microbiano y de la planta de maíz. Adicionalmente, activar la biodiversidad del microbioma nativo e inducido y promover el desarrollo de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos en la rizosfera del cultivo. Posterior a la trilla del cultivo anterior, se activa el suelo con biomoléculas y bioma microbiano, con objeto de transformar, por procesos biogeoquímicos, los esquilmos agrícolas y obtener humus estable y nutrientes minerales. Las biomoléculas también actúan como quelante de cationes requeridos en la nutrición de la planta (calcio, potasio, fósforo, potasio, magnesio, manganeso, cobre, zinc, hierro, etc.). Adicionalmente, las biomoléculas se emplean como base para la reproducción del consorcio microbiano (el consorcio compuesto por 10 litros de cada especie de microorganismo en un total de 100 litros; se ponen en 900 litros de biomoléculas y se dejan reposar, por un tiempo de 24 a 36 horas). Esta preparación es rica en carboxilos, carbohidratos, flavonoides,

promotores del crecimiento vegetal, y promotores de la resistencia sistémica, adquirida e inducida. Se aplican de 160 a 200 litros al suelo durante el ciclo agrícola, las aplicaciones se distribuyen así: 80 litros antes de la siembra, 60 litros en el establecimiento de cultivo y el resto durante los primeros 60 días de emergencia (V6-V8). Se recomienda realizar análisis de la composición de las biomoléculas por la técnica EDS-XRF y vigilar que los parámetros fisicoquímicos sean en promedio de, pH (8.0), potencial óxido-reducción (ORP de -300 mV) y una CE de 20,000 mS cm⁻¹. Después de análisis y según el diagnóstico se realizarán recomendaciones para regular la composición de las biomoléculas.

3. *BIOMA_{microbiano}*, es un consorcio biodiverso de microorganismos “útiles”, compuesto por microorganismos comúnmente encontrados en la rizosfera, filosfera y endosfera del agroecosistema; saprofitos, autótrofos, protótrofos, como micorrizas del género *Glomus*, *Azospirillum sp.*, *Azotobacterias*, *Rhizobacterias*, *Cianobacterias*, *Bacillus sp.*, *Actinomicetos*, *Diatomeas*, *Beauveria*, *Metarhizium*, *Saccharomyces sp.* Estos microorganismos forman una alianza con el cultivo potencializando la capacidad de adaptación biótica y abiótica, ello a través de aportar de manera complementaria genes y procesos metabólicos que la planta puede emplear para la mejora productiva. El *BIOMA_{microbiano}* se aplica para activar procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos y la formación de materia orgánica estable, 100 días antes de la siembra y en el establecimiento del cultivo y primeros 60 días de crecimiento. Su aplicación se realiza al suelo por aspersión o a través de riego; durante el crecimiento se aplica foliar o las raíces (Drench).
4. *MPA_{Si}*, minerales amorfos primarios Silimotion®. Se requiere contar con una buena disponibilidad de silicio, fósforo, magnesio, potasio, hierro y zinc en la rizosfera. Por lo que se recomienda la aplicación de *MPA_{Si}* ricos en estos elementos, y con base al análisis de suelo, aplicarlos entre 250 y 500 kilos por hectárea, según la demanda del suelo-cultivo. La planta de maíz consume aproximadamente 10 g Si, localizando la mayor concentración en la hoja, formando cuerpos sólidos SiO₂·nH₂O, tricomas, fitolitos, células buliformes y en forma soluble y gel. En forma de pequeñas estructuras se encuentra en el olote y epidermis de la semilla. Para la planta de maíz es importante la ocurrencia del proceso biogeoquímico de la biosilificación, por su alto requerimiento, ya que lo emplea para su protección, eficiencia del proceso fotosintético y la asimilación y transporte de nutrientes. La planta dedica gran cantidad de recursos fotosintéticos a través de exudados a la rizosfera para la asimilación de Si en la forma de ácido ortosilícico (H₄SiO₄). Otros elementos que la planta demanda es el K, del cual requiere 12 g y lo extrae

en la forma de K^+ ; de P demanda 2 g, el cual acumula principalmente en el escutelo dentro de la semilla en las partículas de fitato, este lo extrae en la forma de HPO_4^{2-} , y 400 ppm Zn y Fe. Ello además de N, Mg, Cl y S. Estos elementos deben estar disponibles en el suelo en la fracción de sólidos disueltos, estimando una demanda total de aportes de los minerales del suelo de 600-800 kg ha⁻¹ por ciclo agrícola. Durante el desarrollo de la cuarta (V4) y octava (V8) hoja es importante completar las demandas de nutrientes, así como de requerimientos adicionales. Igualmente concluir la aplicación de *BIOMA_{microbiano}* y biomoléculas suplementadas con fósforo, hierro, zinc, cobre, magnesio, potasio, silicio, carboxilos, flavonoides, moléculas promotoras de la resistencia sistémica.

5. Substancias complementarias para el manejo de la disponibilidad de nutrientes y funcionalidad de la MO. Estas sustancias normalmente la planta las produce, pero significan un gran requerimiento de energía, H_2O_2 / CH_3CO_2H . Estas además ayudan a oxigenar el suelo al promover la descompactación del suelo, promover la disolución de los minerales primarios del suelo, activar la descomposición de los esquilmos agrícolas, favorecer el intercambio de gases entre el suelo y el aire del medio ambiente (enriquecimiento del suelo con nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono). Como efecto secundario se logra mejor captura y retención de humedad. Se recomienda aplicar de 5 a 8 litros por hectárea según el diagnóstico previamente realizado.
6. Fertilizantes químicos. Después del análisis de suelo, agua, biomoléculas y materia orgánica sólida-composta con SEM-EDS-XRF, se establecerá la demanda de fertilizantes químicos y la estrategia para aplicarlos al suelo directamente o quelados con biomoléculas.
7. Agroquímicos. La realización de prácticas recomendadas para realizarse 100 días antes de la siembra y durante el desarrollo del cultivo permitirán suprimir el impacto de los factores bióticos y abióticos. Es altamente recomendable dar seguimiento al cultivo, rizosfera y planta, por la técnica de la fenotipificación de la planta y raíz (importante contar con calicatas), cuantificando también la presencia de plagas y enfermedades.

Para el diagnóstico del cultivo de maíz se aplicará la fenotipificación buscando integrar, cuantitativamente, las complejas interacciones entre los diferentes tejidos, su evolución y manejo en los periodos de desarrollo, con la finalidad de comprender la respuesta a la aplicación

de tecnología apropiada y determinar la mejor respuesta productiva. De este modo, los datos fenotípicos ayudan a explicar las funciones de los genes y detectar oportunidades de mejora en la aplicación de procedimientos tecnológicos encaminados a un desarrollo sustentable. También dará una idea de cómo las plantas hacen frente a la limitación de agua y nutrientes, su respuesta a la nutrición lumínica y CO_2 y cómo el microbioma influye en la respuesta de los fenotipos. Los datos fenotípicos sirven como indicadores de la sanidad del suelo, disponibilidad (cantidad, oportunidad), así como estos se distribuyen y acumulan (solubles e insolubles) en los diferentes tejidos. Se pondrá especial interés en los procesos biológicos en los cuales ocurre una expresión de genes, tales como la germinación y desarrollo de embrión. Para este propósito se aplicarán diferentes técnicas de campo y laboratorio, desde imagen fotográfica, video, metrología, metabolómica (seguida a través de microscopía electrónica, espectroscopía de rayos X), microbiología y química (parámetros fisicoquímicos).

Los materiales empleados para la fenotipificación, suelo, agua, planta (raíz, tallo, hojas, flores y frutos) se colectarán siguiendo el estado de desarrollo de la planta, enfatizando que la tecnología MEBA-EDS-XRF permitirá alcanzar el objetivo de diseñar la tecnología apropiada para el cultivo de maíz en la región agroecológica.

Para la fenotipificación química del cultivo de maíz se colectan muestras de suelo y planta. Las muestras colectadas se procesarán en laboratorio, se secarán de 25-50 °C en el secador automático modelo TG200 y se molerán a tamaño de partícula de 2 mm en un molino semiautomático HSM-50H; posteriormente se prensarán para obtener un pellet con 2 cm de diámetro y un espesor de 5 mm en una prensa hidráulica modelo SPECAC, colocándose en un portamuestras. Estas muestras se etiquetarán para su análisis en microscopio electrónico de barrido, Jeol JSM-6010LA, y en el espectrómetro secuencial avanzado de longitud de onda dispersiva de fluorescencia de rayos X, AXIOS^{mAX}. Las muestras frescas para fenotipificación biológica y metrológica se

analizarán dentro de un lapso de 6 a 24 horas después de su cosecha. En caso de muestras de suelo, el diagnóstico incluirá la fracción sólida total y soluble (sólidos disueltos). En la fracción líquida se observará la biodiversidad del bioma microbiano.

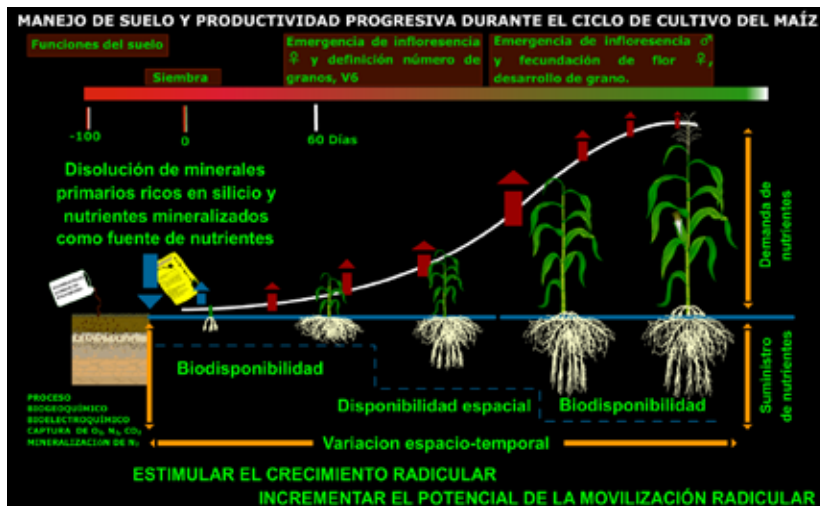
Para el diagnóstico químico y biológico del patrimonio suelo dirigido a la restauración y enmienda de la salud y productividad del suelo, este se fraccionará en diferentes tamaños de partícula empleando un tamizador de partículas modelo AS200. Algunas de las estructuras sólidas de la planta también serán fraccionadas y se facilitará la caracterización las partículas que componen los minerales primarios del suelo, o bien la separación de estructuras sólidas que integran los tejidos vegetales, como son los cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, fitatos (cuerpos de fósforo-potasio-magnesio-hierro-zinc) y gránulos de almidón.

El protocolo propuesto de productividad progresiva con tecnología apropiada, en el cultivo de maíz, está basado en conocimientos más que en intensidad de insumos y es el resultado de un proceso de investigación en campo y laboratorio realizado desde 2006 a 2017, en el cual participaron agricultores de diferentes regiones agroecológicas, así también instituciones de educación e investigación. Para este ciclo PV-2018 se plantea obtener la mayor información posible, ya que se cuenta con una armonización de tiempo biológico y actividades de campo con tecnología apropiada e infraestructura de investigación en laboratorio.

Esta tecnología apropiada se ha aplicado en diferentes agroecosistemas del país y sus resultados han mostrado repetitividad en la mejora de la productividad y calidad de cosecha, siendo importante validarse para su mejora. El diagnóstico con tecnología MEBA-EDS-XFR del sistema suelo-biota-planta debe ser evaluado permanentemente en periodos de 15 días, siempre teniendo 5 repeticiones por muestra, estas seguirán el desarrollo espaciotemporal del cultivo, para el monitoreo efectivo del impacto en la productividad sustentable del cultivo, de tal forma que se realice un uso adecuado de insumos. En la siguiente tabla se presenta el protocolo para el manejo del cultivo de maíz en el ciclo agrícola PV

2018 y de manera gráfica se muestran los puntos críticos de evaluación del seguimiento del cultivo por fenotipificación.

Periodos críticos para el seguimiento del cultivo.



Programa de actividades para la fenotipificación del cultivo de maíz, en los cuales se establecen los tiempos y parámetros a evaluar y su seguimiento a través de actividades de campo y laboratorio aplicando la herramienta MEBA-EDS-XRF. Esta actividad depende del periodo de siembra y manejo en campo, así como la disponibilidad de agua de riego en tiempo y forma.

PROTOCOLO PROPUESTO

Programa de actividades para la fenotipificación en el cultivo de maíz con las etapas de muestreo, diagnóstico y seguimiento de la respuesta a tecnología apropiada.

No.	Actividad	Acción	Objetivo
1	Después de la trilla y/o 60-100 días antes de la siembra	Desmenuzar el rastrojo (esquilmo agrícola), rastrear y/o roturar la tierra con cinceles a una profundidad de 30 cm.	Aírear (incorporar N_2 , CO_2 , O_2), activar procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos, inducir la formación de MO estable y en solución (humificación), y lograr la disolución incongruente de MPA_{Si} y el desarrollo de $BIOMA_{microbiano}$.
2	Muestreo de suelo y agua de riego para el análisis con la técnica MEBA-EDS-FX	Por cada unidad de 10 ha, tomar una muestra, compuesta por 5 submuestras como mínimo.	Las muestras se envían secas y molidas al laboratorio. Las muestras de agua en recipientes limpios, llenos sin aire.
3	Aplicar (H_2O_2/CH_3CO_2H), 5 litros/ha, por aspersión (5 litros en 600-1,000 litros de agua).	Descompactador y activador de la formación de MO funcional, disolución de minerales primarios ricos en silicio (MPA_{Si}).	Los esquilmos agrícolas y minerales primarios forman grumos, promoviendo la oxigenación del suelo, formando lentamente microagregados.
4	Remineralizar el suelo. Según análisis MEBA-EDS-FX del suelo, aplicar por hectárea entre 200 kg de Silimotion®, 500 a 1,000 kg de MO	Aplicar minerales amorfos ricos en zinc, hierro, magnesio, fósforo y silicio, acorde con el diagnóstico del patrimonio suelo. Resulta práctico remineralizar, entre los 50 y 60 días antes de la siembra. La MO mejora la disolución de minerales.	El hierro, zinc y fósforo están directamente relacionados con la eficiencia de la nutrición lumínica y con el número de hileras por mazorca y número de granos por hilera y forman parte del desarrollo del embrión y el escutelo en el grano. El silicio es el transportador de estos nutrientes a la semilla. Junto con el nitrógeno, magnesio y potasio, proporcionan peso, vigor y sanidad al grano.
5	Aplicar MO líquida (biomoléculas-lixiviado). Dosis según el resultado de análisis por MEBA-EDS-XRF. Entre 60 y 80 días antes de siembra.	El lixiviado conduce un gran número de reacciones óxido-reducción (flujo de energía), relacionadas con los minerales primarios, MO y la biota microbiana, promueve la retención de agua en el suelo. Se estimula el flujo de CO_2 del suelo a la atmósfera para la nutrición carbónica.	La MO líquida, biomoléculas-lixiviado, contiene una gran diversidad de moléculas que activan procesos metabólicos en la biota microbiana del suelo, la disolución de los minerales primarios del suelo, siendo procesos que requieren más de 30 días (procesos bio-geoquímicos/electroquímicos). Los procesos activados promoverán una efectiva nutrición mineral y orgánica (promotores del crecimiento vegetal y la resistencia sistémica).

6	Aplicar consorcio microbiano para la restauración de la biota microbiana. Entre 60 a 80 días antes de siembra. Aportar genes del metabolismo potencialmente aliado, rizosfera, filosfera, endosfera.	Restaurar y ampliar la diversidad de biota microbiana que conduce a la biodegradación de esquilmos y la formación de MO estable y soluble, la formación de sustancias promotoras del crecimiento vegetal y la resistencia sistémica.	Una composición integrada por más de 30 especies de BIOMA ^{microbiano} con diferentes funciones metabólicas (biosíntesis y biodegradación) y fisiológicas que complementan la realización de ciclos bio-geoquímicos/electroquímicos fundamentales en la agricultura sustentable.
7	Preparación de semilla para siembra, se recomiendan de 80 a 90 mil semillas por hectárea.	La semilla de maíz tratada o no con agroquímicos, se inocula con BIOMA ^{microbiano} suplementado con P, Fe, Zn, Si y MPA _{Si} , ello para estimular la movilización de carbohidratos y acción de α -amilasa en endospermo y hormonas en escutelo.	Potencialmente se induce la expresión de 25,000 genes y se fortalece a las hojas embrionarias. Se fortalece la movilización de reservas del escutelo para la inducción de sistema foliar y radicular (Mg, zinc, hierro, fósforo y silicio) y coloniza la raíz para la creación de la rizosfera.
8	Riego de pre-siembra y aplicar complemento de fertilización química y mineral inicial.	Aplicar H_2O_2/CH_3CO_2H , 3 litros ha^{-1} , y evitar compactación. Aplicar por separado 10 litros ha^{-1} de BIOMA ^{microbiano} activado con biomoléculas-lixiviado.	Las biomoléculas quelatan macro-micronutrientes y los hacen altamente disponibles. Se recomienda activar el BIOMA ^{microbiano} en un periodo de 24 horas en biorreactor de 1,000 litros. El BIOMA ^{microbiano} y la diversidad de biomoléculas se multiplican.
9	Fertilización química y/u orgánico mineral. En cada uno de los riegos se suministra MO líquida, biomoléculas-lixiviado y BIOMA ^{microbiano} . Se recomienda análisis del agua de riego con MEBA-EDS-FX.	Con fundamento en los resultados de análisis de MO líquida y suelo, se propone la fertilización química y/u orgánico mineral que apoyen la realización de ciclos bio-geoquímicos / electroquímicos.	Con el trabajo realizado en el periodo de 80 a 100 días antes de siembra, se activan los ciclos bio-geoquímicos / electroquímicos, la captura y mineralización de N_2 , CO_2 , O_2 . Se propone la activación de la biota microbiana con MO líquida por un periodo de 24 horas, con suplementos de la nutrición. Se promoverá la agricultura sustentable y de bajo costo.
10	Siembra.	Se recomienda sembrar a una densidad de 80 a 90 semillas por hectárea. Esta densidad permite una adecuada nutrición luminica, carbónica y mineral.	El manejo del cultivo tiene una meta de rendimiento superior a 16 ton ha^{-1} , con base en la expresión de la floración femenina y masculina y promover el desarrollo de número de hileras y número de granos por hilera en la mazorca, con la adicional ganancia de peso específico en grano.

11	Emergencia y desarrollo de rizosfera. Etapa de VE a V5. Se realizan evaluación de campo y colectan muestras de planta para su evaluación en MEBA-EDX-FX.	En la etapa de emergencia del coleóptilo a nivel del suelo (VE) a desarrollo de hojas embrionarias (V5), los ciclos bio-geoquímicos / electroquímicos, las biomoléculas-lixiviado y BIOMA _{microbiano} ya deben estar activas y en desarrollo. Evaluar el desarrollo de la rizosfera en campo y con la tecnología MEBA-EDS-FX	Realizar fenotipificación de rizosfera, supervisar el desarrollo de la rizosfera. Es prudente instalar calicatas, con 35 a 40 cm de profundidad. Evaluar el desarrollo de las hojas embrionarias, su nutrición con P, Fe, Zn, Si, y diagnosticar daño causado por fenómenos bióticos y abióticos. Es el momento apropiado para corregir deficiencias.
12	Desarrollo foliar y generativo. Etapa de V6 a V8. Etapa crítica para la definición de la productividad. Ocurre la expresión del brote vegetativo compuesto o unidad funcional repetitiva, Fitómero, compuesto cada uno por una hoja, un nudo, un entrenudo y un brote axilar. En maíz, el brote axilar está relacionado clonalmente con la hoja que está encima y dos nudos arriba.	Se completa el desarrollo de planta embrionaria y aparecen tejidos con una alta expresión diferencial de genes en respuesta al manejo del cultivo (V6-V8), e inicia la expresión de crecimiento generativo con la aparición de brotes axilares florales femeninos y en la región apical se desarrolla el brote masculino o espiga (panoja). También se definen hileras y granos por hilera (número de óvulos). En los tallos ocurre una alta expresión de proteínas de transporte (acuaporinas) y la concentración de sólidos disueltos es mayor a 7,000 ppm.	En esta etapa de diferenciación floral es importante que en el riego se administre MO biomoléculas-lixiviado y BIOMA _{microbiano} suplementado con Zn, Fe, Si, P, Mg y nitrógeno. Esto permite la expresión diferencial genética. Ocurre una gran demanda de silicio, se observa una movilidad con el K y el Cl. Realizar diagnóstico fenotípico de rizosfera, a través de la calicata, y de requerirlo aplicar H_2O_2 / CH_3CO_2H en el riego. Ocurre una gran transpiración, por ello es crítico el aporte de agua. Es deseable que los sólidos disueltos del suelo se encuentren por arriba de 500 ppm. El suelo debe emitir $30 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y apoyar la asimilación en esta etapa con más de $1.5 \text{ ton de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$.
13	Elongación de tallo, tejido foliar y floral. Etapa de V9 a V12: Alta nutrición luminica y carbónica para la acumulación de reservas de carbohidratos. En MEBA-EDS-XRF, evaluar y dar seguimiento a la acumulación y movilización de reservas. Buscar estructuras anatómicas que definen la productividad.	Ya definidos en número total de óvulos (granos), se inicia la acumulación temporal y movilización de reservas en tallo, para satisfacer la demanda de carbohidratos requeridos para la formación de los granos. También ocurre la preparación de la cantidad de polen y periodo para fertilizar los óvulos (desde el punto de vista fisiológico y resistencia sistémica).	En esta etapa la rizosfera y tejido foliar trabajan a su máxima capacidad. Se completa la demanda de Si, P, Fe, Zn. Ocurre una gran movilización de reservas de carbohidratos de la hoja al tallo, por lo que se requiere contar con disponibilidad de P, Cl y K. Se recomienda realizar la fenotipificación de la planta para observar el potencial productivo de la planta y su posible corrección. Gran demanda de recambio de aire para la fertilización carbónica; la iluminación de las hojas es importante para la nutrición luminica.

14	Preparación fisiológica para la movilización de reservas de carbohidratos de hoja-tallo-grano. Etapa de V13 a V14.	La planta en esta etapa establece las demandas de nutrientes y carbohidratos, por ello emite sus raíces nodales de "anclaje", estas se encargan de suministrar agua y nutrientes para satisfacer las demandas. Esta última rizosfera la forma a 15 cm de profundidad; es importante contar con gran abundancia de raíces absorbentes. Realizar fenotipificación de la planta (rizosfera-tallo-hojas-floración femenina y masculina). Se establece la unidad estructural, fotómero, compuesta por entrenudo, nudo, hoja, el perfil y el meristemo apical.	En esta etapa se desarrolla la última capa de rizosfera, se requiere de buena oxigenación del suelo y movilización de nutrientes suelo-nutrientes en solución-raíz (en esta etapa se pueden perder de 4 a 5 ton por hectárea de grano, si la planta moviliza reservas a la raíz-suelo, para asimilar nutrientes de la demanda). Es importante suplementar en el riego con MO biomoléculas-lixiviado, 50 litros ha^{-1} , restaurar BIOMA ^{microbiano} con la aplicación de 5 litros ha^{-1} , y si el suelo esta compactado aplicar 1.5 litros por hectárea de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$.
15	Se hacen visibles la floración masculina o panícula (espiga) y floración femenina (mazorca). Etapa V.	En esta etapa (VT) culmina la expresión diferencial de la espiga (listo para polinizar) y óvulos en la mazorca. Se producen en promedio 6 millones de granos de polen por planta (~2.0 g en 5 días). El perfil se observa definido con sus características morfológicas.	Los requerimientos de nutrientes deben de estar satisfechos, el polen demanda P, Mg, entre otros y las reservas de N y carbohidratos inician su movilización hacia la mazorca y garantizan la polinización de los óvulos (grano). En las hojas se observa, la máxima acumulación de Si, a través de tricomas, fitolitos, células buliformes y estructuras amorfas laminares. Ocurre gran asimilación de energía lumínica.
16	Antesis o floración femenina. Etapa R0.	En esta etapa (R0), es importante la sincronización de la floración femenina y la masculina. Para lograr un buen periodo de fecundación de los óvulos. El cultivo debe cubrir las demandas hídricas y lograr la mayor vida media del polen. Ocurre emisión y desarrollo de raíces adventicias y la asimilación de nutrientes para completar las demandas.	La movilización de reservas de la hoja y tallo se incrementan, por lo que el P, K, Fe, Zn, Si y N disponibles en la planta se emplean en este proceso fisiológico. La planta siempre previene las demandas de nutrientes. Es importante mantener la rizosfera con humedad, actividad microbiana y soporte de MO. Todo aplicado a través del riego preferentemente.

17	Los estigmas o estilos son visibles. Etapa R1.	Los ovarios desarrollan un tubo polínico suficientemente grande que es visible, e inicia el proceso de fecundación por el polen (floración masculina).	La humedad en el cultivo es importante para la sincronización de la floración y el proceso de fecundación. En esta etapa se debe garantizar la disponibilidad en la fación soluble de la rizosfera de Fe, Zn, P, carboxilos de la materia orgánica (humus). Se debe realizar fenotipificación de la planta y rizosfera.
18	Los ovarios establecen la demanda de reservas. Etapa R2.	En esta etapa los ovarios, ahora granos, se llenan de un líquido claro y es posible observar al embrión, donde hay gran expresión de genes.	La movilización de reservas de la hoja y tallo hacia el grano es intensa y la demanda de Si, P, K, Mg, S, es alta para el desarrollo de embrión, escutelo, aleurona y endospermo. Es importante mantener el diagnóstico de la rizosfera mediante las calicatas. En el riego se suministran MO biomoléculas-lixiviado y BIOMA ^{microbiano} . Se debe mantener hidratada a la planta.
19	Los granos se llenan de líquido lechoso blanco. Etapa R3.	Etapa lechosa, la acumulación de gránulos de almidón en el endospermo se inicia, junto con la acumulación de reservas de minerales, hormonas y proteínas en el escutelo.	La movilización de reservas de carbohidratos hacia el grano es intensa y ocurre una alta formación de gránulos de almidón (llenado de grano). El escutelo, tejido que rodea al embrión, acumula reservas.
20	Los granos se llenan de una pasta blanca. Etapa R4.	Etapa masosa, el embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano. Continúa en las células del endospermo la acumulación de carbohidratos en la forma de almidón.	En esta etapa prácticamente está definida la cantidad y calidad de cosecha. La demanda de nutrientes por la planta y rizosfera es lenta y los tejidos fisiológicamente están maduros. La gluma, bráctea que une al grano de maíz con el olote, se encuentra con gran acumulación de cuerpos $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Culmina la demanda de reservas en endospermo, escutelo y aleurona, el embrión está fisiológicamente desarrollado.
21	Maduración fisiológica del grano. Etapa R5 y R6.	Las células del endospermo se llenan de gránulos de almidón y las células del escutelo acumulan proteínas y complejo de fósforo, potasio, magnesio, hierro y zinc (gránulos de fitatos). La mayor acumulación de fitatos está relacionada con el peso específico del grano y sanidad.	Los granos llegan a su madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano y la humedad del grano es aproximadamente de 30%. Aunque para su cosecha se recomienda un contenido de humedad del 14%.

SOIL₄⁺: MANEJO SUSTENTABLE DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PRIMARIA

La producción agrícola actual está fundamentada en trabajo holístico-empírico, con limitado incremento en la productividad, alto consumo de insumos y empobrecimiento del patrimonio suelo y del ecosistema agrícola. Planteamos la siguiente propuesta: Producción = (Experiencia + Conocimiento) * 2 Actitud, esta actividad de capacitación se presenta en los siguientes párrafos.

SUELO: ACTIVACIÓN DEL PATRIMONIO AGRÍCOLA Y DEL PRODUCTOR

Disolución incongruente de los minerales primarios del patrimonio suelo: Un suelo productivo contiene 4,500 ton ha⁻¹ de minerales primarios en la capa arable de 40 cm. La erosión eólica, hídrica, química, biológica (causada por la rizosfera y demandas de los vegetales cultivados) ha causado que en promedio los suelos agrícolas tengan un peso de 3,400 ton ha⁻¹ (análisis de suelos con la técnica de EDS-X en 2011-2013), lo que significa un desgaste de 1,100 ton ha⁻¹ de minerales primarios en un poco más de 100 años de actividad. Esta pérdida hace que los suelos sean ácidos y de baja o muy baja conductividad eléctrica (sólidos disueltos) causada por la dureza, careciendo de biota microbiana benéfica y materia orgánica estable y fresca. Todo esto promueve una baja captura

de agua, nitrógeno (y su mineralización), bióxido de carbono y una más acelerada erosión, con mínima productividad.

El agua de lluvia puede disolver los minerales primarios del suelo, ocurriendo una excelente productividad, y aportando a la fracción soluble del suelo sólidos solubles en una concentración de 576 ppm (mg l^{-1}), lo cual significa que, si ocurre una lluvia de 500 mm, potencialmente se disuelven en un ciclo agrícola 2.09 ton ha^{-1} . En los suelos cultivados con alta erosión, la disolución por lluvia en promedio es de 96 ppm, lo que equivale a 0.48 ton ha^{-1} , siendo esto un factor limitante de la productividad agrícola. La disolución de los minerales primarios del suelo depende de la composición y cristalinidad de ellos, siendo fundamental el diseño y aplicación de técnicas para mantener una concentración adecuada de sólidos disueltos en la rizosfera de los cultivos. Por otro lado, la composición mineral de una cosecha de maíz seca es de 50 ton ha^{-1} ; con buen crecimiento a su madurez fisiológica (~85% del crecimiento total), contiene un total de 2.2 ton ha^{-1} de 16 minerales: el nitrógeno, silicio y potasio conforman el 77% de estos, el resto 47.7 ton ha^{-1} lo componen carbón, oxígeno e hidrógeno. En los programas de fertilización química del maíz, cuando mucho se aporta el 30% de las demandas de nitrógeno, fósforo y potasio, no aportando silicio. El silicio se encuentra en los minerales primarios del suelo ($600 \text{ a } 800 \text{ ton ha}^{-1}$) que deben disolverse.

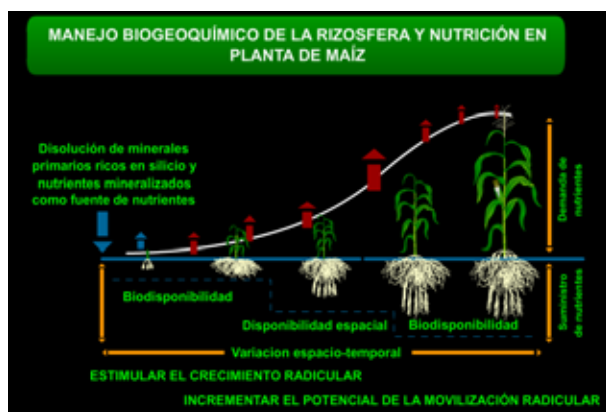
La limitada disolución de los minerales se ve reflejada en la baja productividad y calidad de la cosecha de maíz y otros cultivos, adicionalmente se observa baja supresión y resistencia de las plantas a factores bióticos y abióticos. Esto causado fundamentalmente por la erosión del patrimonio suelo, como consecuencia de un nulo manejo sustentable de este patrimonio, aunado al alto uso de insumos químicos y la gran extracción de recursos, como el silicio, que en cada ciclo de cultivo es requerido por las plantas para su nutrición, protección biótica y abiótica, alcanzando a extraer $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, más la pérdida de suelo causada por la erosión ambiental. Se estima un detrimento total anual de

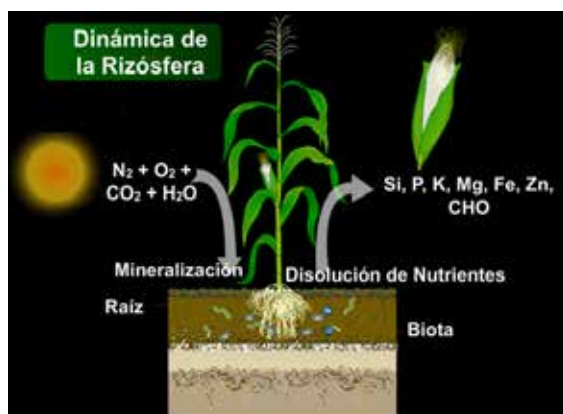
1.2 ton de silicio $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. El silicio, al igual que otros elementos de la nutrición, presenta ciclos biogeoquímicos en los cuales la investigación mexicana ha estado ausente, al igual que el manejo de respuestas fisiológicas de la planta, para conducción de una producción sustentable.

Con base en resultados propios de investigación que se han realizado en el campo de México y la realizada a nivel internacional, se ha establecido un programa de manejo sustentable con crecimiento progresivo de productividad y de mejora del patrimonio suelo, denominado Soil4M-Mas, que se integra de la siguiente propuesta de manejo tecnológico.

FUNDAMENTOS DE LA INNOVACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO SOIL4M-MAS:

Es fundamental que, antes de sembrar, activemos el suelo para el desarrollo dinámico de la rizosfera, induciendo la disolución incongruente, la captura del CO_{2g} de la atmósfera, la biodegradación de la materia orgánica, la restauración de la biota microbiana, la captura de N_2 atmosférico y su mineralización y la remineralización y/o restauración de los minerales primarios ricos en silicio. Este proceso de activación se inicia en promedio 100 días antes de la siembra, lo más pronto posible después del fin de ciclo agrícola, como se ilustra en la siguiente figura:





LOS CULTIVOS PRESENTAN EN SUS MECANISMOS DE PRODUCTIVIDAD:

Biosilicificación: Proceso de disolución y solubilización de silicio presente en los minerales primarios (MPA_{Si}) del suelo, asimilación por la rizosfera en la forma de ácido ortosilícico soluble (H_4SiO_4) mediado por proteínas de transporte de la membrana plasmática celular del tipo acuaporinas. Su transporte y distribución en los tejidos va acompañado de cationes (Fe^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cu^{2+} , H_2PO_4^-) en la forma de proceso silicatos y acumulación de silicio amorfo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en epidermis foliar, tricomas, y gluma. La biosilicificación se encuentra relacionada además con la resiliencia biótica y abiótica. El **Silimotion®** es un mineral primario que ayuda a la movilidad y transporte de nutrientes, así como a la acumulación de silicio en los tejidos de las plantas, como son los tricomas y fitolitos que mejoran la resistencia y tolerancia a factores bióticos (patógenos, insectos de suelo y foliares) y abióticos (sequía, humedad, alta temperatura y radiación solar).

Metabolismo ERO: El metabolismo de especies reactivas de oxígeno (ERO) forma parte de la fertilización lumínica y está ligado con los mecanismos de resistencia biótica y abiótica y consecuentemente con la productividad. Este metabolismo se fundamenta en la producción de peróxido de hidrógeno, mediado por especies de cobre, zinc y man-

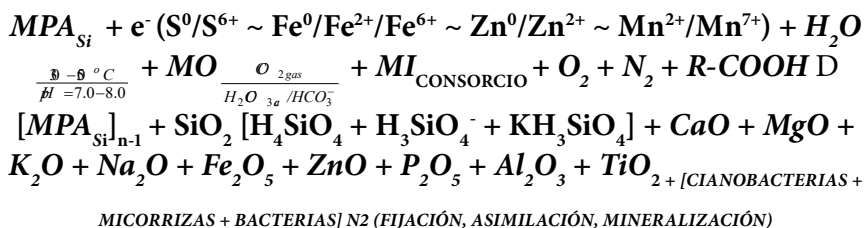
ganeso que se produce en el cloroplasto, mitocondria, peroxisoma y citoplasma de las células de las hojas. Las especies de oxígeno reactivo y peróxido de hidrógeno, además de la protección biótica y abiótica, son liberadas por los exudados de la raíz, para la disolución de minerales primarios y regulación del potencial REDOX, aunque es un gasto de energía muy alto para la planta, por lo que se merma su producción, para lo cual se puede utilizar **D'Tox®**. Este producto, además de sanitizante, es un excelente descompactador de suelo, ya que permite el flujo de energía y de gases suelo-ambiente. El metabolismo ERO forma parte del metabolismo de resistencia sistémica adquirida e inducida.

Metabolismo del fosfato: Igual que el silicio, el fósforo de la forma sólida se solubiliza por factores bióticos y abióticos (fosfatasa, micorrizas, ácido ortosilícico, microorganismos) y se transporta por proteínas del tipo acuaporinas y puede ser mediado por silicatos. El fósforo, junto con el hierro y zinc, están relacionados directamente con la cantidad, calidad de granos en la mazorca y producción de azúcar. Específicamente, el fósforo se acumula en las semillas, en las células de la aleurona y escutelo en la forma de estructura sólidas llamadas fitatos. La cantidad de fósforo acumulado está relacionado con la calidad y sanidad de las semillas. El **O4mas®** proporciona los requerimientos de fósforo entre otros elementos

Desarrollo de la rizosfera: Las raíces de las plantas exudan una gran cantidad de carboxilos (málico, cítrico, fumárico), peróxido de hidrógeno (**D'Tox®**) y carbohidratos, como mecanismos para disolver los minerales primarios ricos en silicio del suelo; asimismo, inducen la interacción con la biota microbiana, mejorando la disponibilidad de nutrientes y los mecanismos de resistencia biótica e incrementando la productividad de la planta.

Ciclos biogeoquímicos: La productividad progresiva de los cultivos se relaciona con la eficiencia con la que se realicen los procesos biogeoquímicos de los nutrientes, nitrógeno, silicio, fósforo, calcio, magnesio, etc. La propuesta de manejo se fundamenta en la experiencia holística del

productor y en desarrollo de ciclos biogeoquímicos (BIOGEO®), que inician con la disolución del suelo descrita por la ecuación siguiente:



TECNOLOGÍA SOIL₄M-MAS:

1. **M₁:** Manejo o experiencia holística del productor, misma que se apoya con actualización de la investigación científica, capacitación a través del extensionismo transdisciplinario y actividades de innovación y desarrollo tecnológico. Aquí se incluyen todas las actividades relacionadas con el manejo sustentable del suelo, disolución incongruente de nutrientes, conservación, aprovechamiento de agua y nutrición vegetal.
2. **M₂:** Minerales primarios amorfos ricos en silicio (MPA_{Si}), como el Silimotion®, que componen la fracción cultivable del suelo ($\approx 4000 \text{ ton ha}^{-1}$), biotita, albita, moscovita, etc., y su caracterización química en un índice agrícola de sustentabilidad del suelo (IASS) o índice de productividad primaria del suelo (IPPS), el cual se determina considerando toda la composición química elemental del suelo y su relación con la composición de un suelo sustentable sin erosión (fresco), con una original composición de minerales primarios ricos en silicio, hierro, aluminio, calcio, potasio, magnesio, cloro, fósforo, sodio, zinc, manganeso, cobre, nitrógeno, titanio y carbono (mineral orgánico) como el O4mas®. El IASS permite establecer el manejo tecnológico para la disolución de los minerales del suelo que enriquecen la solución del suelo, de la cual la rizosfera (macro, microbiota-raíz) asimila los nutrientes para el desarrollo del cultivo. Así también, se establece la cantidad de minerales primarios ricos en silicio necesarios para remineralizar de manera sustentable el suelo, revertir el proceso de erosión y mantener el suelo “fresco” como el O4mas®. El valor de referencia de IASS para un suelo productivo y sustentable es de 50%. El IASS indica también la disponibilidad de silicio soluble en la forma de ácido ortosilícico (H₄SiO₄), el

cual activa la disolución del fósforo y hierro, e incrementa la concentración y disponibilidad de todos los nutrientes en la solución del suelo, además de que forma parte de la movilización de los nutrientes desde la solución del suelo a la raíz de la planta y también dentro de los tejidos de esta. El mantener en balance a los minerales del suelo establece condiciones para la ocurrencia de un flujo de electrones tal que se crea un estado óxido-reducción que permite intercambio de energía y nutrientes minerales y orgánicos entre los componentes de la rizosfera. Un mineral fresco, disponible en el mercado es el O4mas®, del cual se deben aplicar de 200 a 500 kg ha⁻¹ para restaurar la capa arable de 10 cm, donde ocurre la mayor actividad de la rizosfera.

3. **M₃:** Materia orgánica (MO) mineralizada con Biogeo® (sólida) y biomoléculas o lixiviados (líquida), el carbono orgánico de los esquilmos agrícolas y/o estiércol de animal es fuente de carboxilos (desde ácido carboxílico, ácido málico, ácido cítrico, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, etc.) para la disolución de los minerales primarios ricos en silicio y enriquecer la solución del suelo con nutrientes y energía REDOX. Este proceso geológico-químico-biológico constituye el inicio del ciclo biogeoquímico de los nutrientes que los cultivos requieren para un desarrollo sustentable. Por lo que la MO tiene una función importante como proveedor de sustancias húmicas ricas en carboxilos (R-COOH)_n, que mejoran la capacidad de intercambio catiónico del suelo y forman quelatos con los minerales solubles, haciéndolos altamente disponibles para el sistema de la rizosfera. También proveen bióxido de carbono gaseoso y soluble (CO₂/H₂CO₃), el cual es activo para la disolución del suelo y, al liberarse a la atmósfera, incrementa la fotosíntesis y limita el agobio causado por deficiencias de CO₂ atmosférico-fertilización carbónica. Por ello, el enriquecimiento del suelo con MO mineralizada y la inducción de la descomposición de los esquilmos agrícolas vía la acción microbiana son una alternativa para la disolución continua de nutrientes durante el desarrollo del cultivo. Adicionalmente, la materia orgánica soluble (biomoléculas) además de proveer sustancias ricas en carboxilos, suministra sustancias químicas con actividad biológica (promotor del crecimiento vegetal y actividad biocida). También la MO líquida (lixiviado) proporciona mejora y estabilidad de factores fisicoquímicos, como el pH, C.E., y potencial óxido-reducción.
4. **M₄:** Microorganismos o consorcio microbiano Nan-O-Fert®, integrado por una biota eficiente en la degradación selectiva de la MO, además de disolver, mineralizar, movilizar, transportar y fijar nutrientes para las plantas, provee sustancias orgánicas con acción biológica para el desarrollo adecuado

de las plantas (precursores químicos de hormonas y biocidas). Suprimen o limitan el desarrollo de organismos patógenos a través de procesos simbióticos y de vida libre.

SECUENCIA DE IMÁGENES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN CAMPO:

Unidad productiva integral, producción de biomoléculas-lixiviado orgánico.

	
Producción de lixiviado orgánico, para inducción de resistencia sistémica vegetal y la disolución incongruente del patrimonio suelo, para incrementar la disponibilidad en cantidad y calidad de nutrientes en el suelo y promover el desarrollo de ciclos biogeoquímicos.	
	
Producción intensiva de lixiviado orgánico.	
	
Producción de materia orgánica funcional, líquida y sólida.	

	
Producción de consorcio microbiano benéfico, para la supresión y control de factores bióticos y abióticos; un total de 10 especies de microorganismos	
	
Capacitación, innovación y transferencia tecnológica transdisciplinaria a técnicos y productores.	
	
Producción de lixiviado orgánico, rico en azúcares, humus-grupos carboxilos, sustancias biológicamente activas/reducidas, nutrientes minerales/reducidos, pH mayor que 7.5, REDOX negativo	

MICROORGANISMOS EN EL MANEJO SOIL4M-MAS

Microorganismos o consorcio microbiano Nan-O-Fert®, integrado por una flora eficiente en la degradación selectiva de la MO que disuelven, mineralizan, movilizan, transportan y fijan nutrientes para las plantas. También proveen sustancias orgánicas con acción biológica para el desarrollo adecuado de las plantas (precursores químicos de hor-

monas y biocidas) y suprimen o limitan el desarrollo de organismos patógenos a través de procesos simbióticos y de vida libre. El tipo de microorganismos que se utiliza para formar el consorcio microbiano Nan-O-Fert® son:

1. ***Azospirillum brasilense***: Fijadora de nitrógeno y promotora del crecimiento.
2. ***Beauveria bassiana***: Entomopatógeno capaz de parasitar insectos, insecticida biológico.
3. ***Bacillus subtilis***: Libera sustancias con actividad fungicida.
4. ***Bacillus thuringiensis***: Libera sustancias con actividad insecticida y promotora del crecimiento.
5. ***Metarhizium anisopliae***: Entomopatógeno capaz de parasitar insectos.
6. ***ectomicorizas/endomicorizas***: Asimilación y movilización de fósforo, promoción del crecimiento y mejora del rendimiento de cosecha.
7. ***Rhizobium sp.***: Bacteria simbiótica, fijadora de nitrógeno.
8. ***Trichoderma harzianum***: Control y supresión de patógenos, capaz de liberar sustancias antagonicas.
9. **Consortio de 60 microorganismos que amplían y fortalecen el metabolismo primario y secundario (biodiversidad genética), MEPS**: Bacterias acidolácticas, proteobacterias a, b y g, Levaduras, Microorganismos fotoautotróficos).
10. **Consortio de microorganismos biogeo-bioelectroquímico**. Microorganismos con alta capacidad de liberar enzimas (catalizadoras) para la hidrólisis de carbohidratos, proteínas, celulosa, lignina y promover reacciones REDOX para el flujo de energía (electrones).

TECNOLOGÍA APROPIADA: PRODUCCIÓN DE BIOMOLÉCULAS-LIXIVIADO

Este sistema consiste en producir un líquido con alta concentración de biomoléculas-lixiviado orgánico, con actividad química y biológica, para aprovechar de manera eficiente el patrimonio suelo e inducir la resistencia sistémica en las plantas. Para lograr este propósito, se requiere que el líquido de biomoléculas contenga en su composición una gran diversidad de sustancias con radical carboxilo [$\sim\text{COOH}$] con diferente peso molecular, y ser químicamente reducidas, capaces

de donar energía, con un pH alcalino superior a 7.5, una conductividad eléctrica mayor de 12 a 17 mS/cm y potencial REDOX de -300 mV.

La adecuada producción y aplicación de biomoléculas permiten tener una herramienta eficiente para la disolución de minerales primarios que aportan nutrientes a la solución del suelo, siendo aprovechados por los cultivos agrícolas. Esto ocurre en la capa arable de 40 cm. Asimismo, las biomoléculas se emplean para activar el desarrollo y multiplicación del bioma microbiano, promueven la transformación y aprovechamiento de los esquilmos agrícolas, mediante materiales estables como el humus, que actúan como base para formar quelatos, estando ellos disponibles en el suelo.

En la producción de biomoléculas se recomienda que con regularidad se cuantifique el pH, el potencial de óxido-reducción (ORP) y la conductividad eléctrica, con sus correspondientes potenciómetros (medidores).

PROCEDIMIENTO E INSUMOS

Insumos

1. Estiércol seco vacuno de tres a seis meses de edad
2. Mineral primario BIOGEO®, 100 kg, “fresco” y amorfo, el activador mineral estimulante de los ciclos biogeoquímicos y bioelectroquímicos.
3. Bomba sumergible.
4. Película de plástico de 600 micras de espesor (tipo geomembrana) de 3.0 m ancho X el largo que se requiera.
5. Tinaco de plástico tipo rotoplas de 1000 o 5000 litros.
6. Cedazo de plástico para remover y cribar los sólidos.
7. Ácido acetilsalicílico, 100 g por cada mil litros de producto terminado.

PROCEDIMIENTO

Una superficie de 2.5 m X 5.0 m, con una pendiente de 3%. En la parte baja se realiza una perforación en la cual se insertarán los recipientes de plástico, donde se recuperarán los lixiviados orgánicos.

1. La superficie se recubre con la película de plástico, evitando la pérdida de líquido por los bordes laterales y el superior. En la parte inferior colocar tubería de 4" para conducir el lixiviado orgánico hacia el recipiente de plástico, colocando a la salida de la tubería un tramo de cedazo de plástico para el tamizado. De preferencia se busca que la parte central de la superficie tenga pendiente hacia el centro para la mejor recuperación de lixiviado orgánico.
2. Aplicar una capa de estiércol de aproximadamente 15 cm de altura y agregar en la superficie de este una cubierta de polvo de activador mineral **Biogeo®**; humedecer con agua el estiércol (no se deben hacer charcos).
3. Repetir la operación hasta tener una altura de 1.5 metros.
4. El lixiviado orgánico se recupera en el recipiente plástico del tipo rotoplas y, por cada 1,000 litros de lixiviado, se adicionan 100 gramos de ácido acetilsalicílico (previamente disueltos en alcohol al 60%).
5. El lixiviado se recircula por 30 días. No se requiere mover el estiércol.
6. El lixiviado se recupera y almacena en recipientes de plástico, en un lugar fresco y a la sombra.
7. Se recomienda mantener bajo cubierta este sistema de producción de lixiviado orgánico.

Se recomienda aplicar el lixiviado orgánico en una dosis mínima de 100 litros por hectárea después de la cosecha y entre 100 y 60 días antes de la siembra, hasta completar 400 l/ha. Se pueden realizar aplicaciones periódicas después de la siembra, a la 5 y 8 hoja y en desarrollo de mazorca. Esto vía riego o "*in drench*" lo más próximo al sistema radicular.

INOCULACIÓN DE SEMILLAS

Las semillas de maíz son tratadas para mejorar la germinación promoviendo la movilización de reservas de carbohidratos (almidón) del en-

dospermo, los minerales y las proteínas que se localizan en el escutelo, para protegerlas de la acción de factores bióticos y abióticos.

Cada saco de semilla se trata de la siguiente manera:

Materiales:

1. Inóculo: 100 mililitros de **Nan-O-Fert®**, junto con 100 mililitros de lixiviado orgánico
2. 100 gramos de **O4mas®**, mineral rico en hierro, zinc, silicio, fósforo, potasio, magnesio

Las semillas se tratan un día antes de la siembra, o bien, que se sequen después del tratamiento. Se agregan cada uno de los insumos de la siguiente manera: el inóculo de biota microbiana y lixiviado y posteriormente aplicar los minerales. Se mezclan gentilmente y se dejan secar. Después del tratamiento, las semillas estarán listas para la siembra.

LA NUTRICIÓN CUÁNTICA (LUMÍNICA) EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE

El ecosistema de la producción primaria cuenta con cuatro recursos: radiación solar, minerales primarios del suelo, aire y agua, a partir de los cuales se desarrollan la macro y microbiota en donde el crecimiento y desarrollo se regula por procesos bioelectroquímicos y biogeoquímicos que hacen posible la asimilación, distribución y almacenamiento de recursos de energía y minerales que de manera progresiva los transforman en una masa (biomasa). En este texto se enfatizará la regulación del desarrollo bioelectroquímico, que se realiza a través de procesos REDOX y especies reactivas de oxígeno (ROS), como una forma de regular el metabolismo y resiliencia del bioma en un agroecosistema.

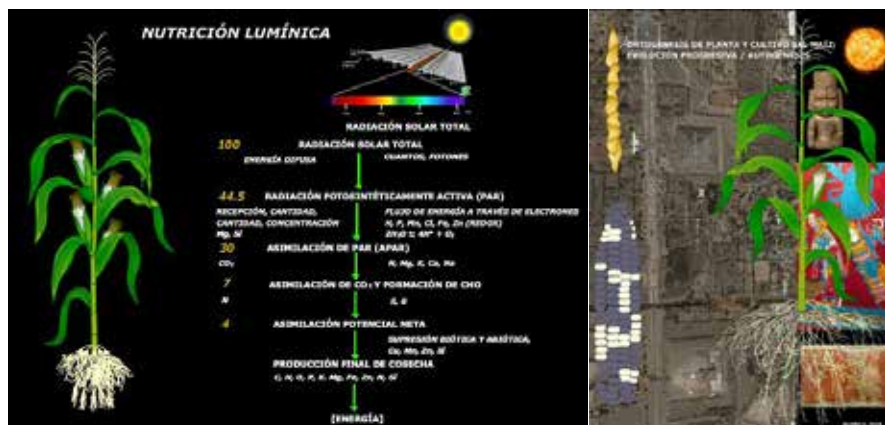
En las siguientes figuras se muestra la disponibilidad y asimilación de recursos (nutrición): radiación solar, nutrición lumínica, agua, nutrición con electrones y protones H^+ , aire, nutrición carbónica y respiración, patrimonio suelo, nutrición mineral y materia orgánica y nutrición de reciclado de materiales ricos en energía contenida en

estructuras de carbón con o sin actividad biológica específica. Estos procesos de nutrición generan gradientes de energía que durante el crecimiento son acumuladas progresivamente en estructuras ricas en sustancias estables, espacio temporal, que permiten la transferencia de biomasa en un agroecosistema, cumpliendo la ley de la conservación de la materia propuesta por Mijaíl Lomonósov en 1748 y Antoine-Laurent Lavoisier (1785): “La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”.



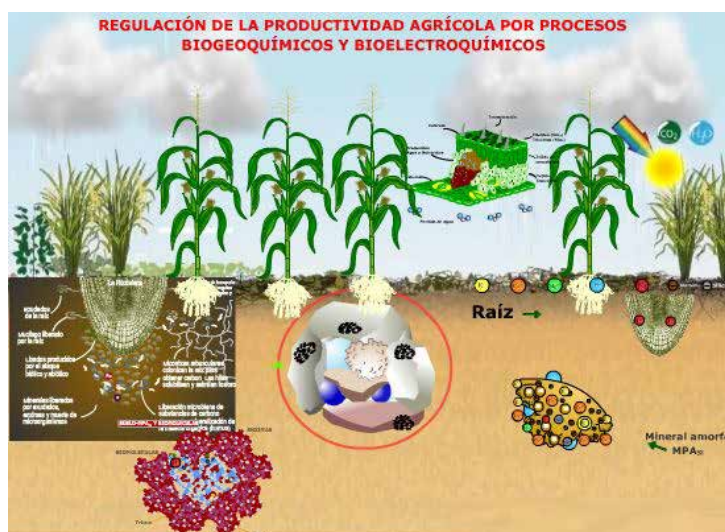
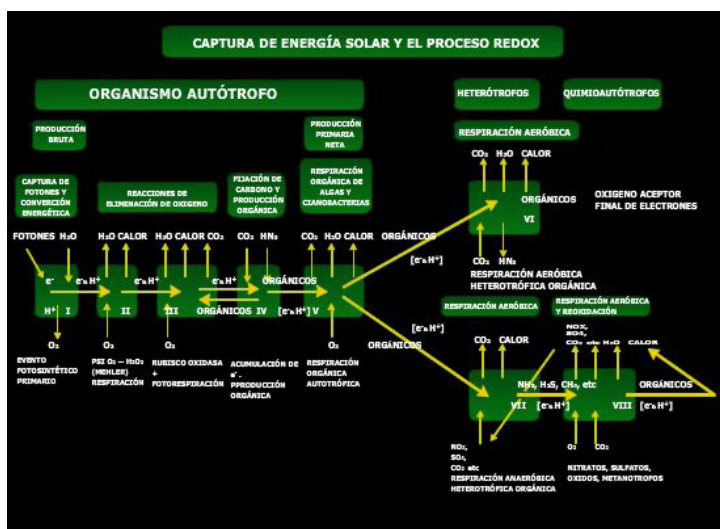
La asimilación de energía solar y su regulación por procesos bioelectroquímicos. El metabolismo REDOX y las especies reactivas de oxígeno (ROS) permiten la señalización para que el agroecosistema responda a la adaptación biótica y abiótica, y mejorar su productividad de manera progresiva gracias a la capacidad ortogenética, respuesta que está mediada por el metabolismo del carbón-uno regulado por S-Adenosilmetionina (SAM). A partir de esta molécula, es posible la expresión diferencial de genes y la regulación vía hormonas y moléculas activas. En las siguientes figuras se ilustran los nutrientes requeridos por el sistema de captura de energía solar en las hojas de las plantas, Si, P, Fe, Zn, Cu, Mg, Mn, Cl. Así también se muestra cómo la planta de maíz, a lo largo de su evolución en 10,000 años, pasó de producir de menos de 60 gr pl⁻¹ de grano a más de 370 gr pl⁻¹ y, por manejo de recursos del agroecosistema, de 0.05 a 3.5 kg m⁻², con una productividad total de biomasa de 0.1 a 5.5 kg m⁻², misma que se incrementará

al ampliar la frontera de conocimiento que integre la fenotipificación química, biológica y la regulación por procesos REDOX, ROS y el metabolismo carbón-uno.



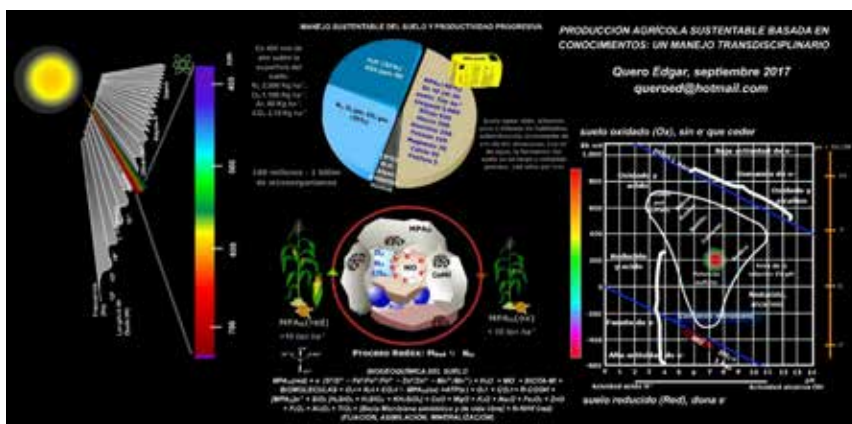
La mejora de la productividad de los agroecosistemas requiere de la integración del conocimiento desde la captura de energía y la energización de electrones hasta su movilización de organelo a organelo, de célula a célula y de célula a tejido (también de organismo a organismo), mediada por moléculas que se reducen y oxidan, en la presencia de O₂ como aceptor final de electrones, y que terminan almacenándose en moléculas estables con alto contenido de energía. Esta integración resulta posible a través de establecer con claridad los procesos bioelectroquímicos y biogeoquímicos.

En las siguientes figuras se muestra el seguimiento del proceso de captura de cuantos de luz y el flujo de electrones en los tejidos del agroecosistema, mediado por procesos bioelectroquímicos y biogeoquímicos.



Esta integración se ilustra en la siguiente figura, en el cual destaca la regulación del agroecosistema por procesos bioelectroquímicos, donde el potencial REDOX induce el flujo de la carga de electrones, e^- (energía), y permite la movilización de recursos mediados por H_2O , para hacer

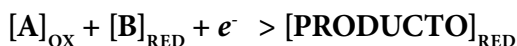
posible una mejor productividad del agroecosistema. Esto es la energía de los fotones de luz al sistema REDOX como una forma del manejo de la productividad de los agroecosistemas. Aquí se hace mención a la participación fundamental del silicio (Si) en la forma de ácido ortosilícico (H_4SiO_4), en este proceso. Recordemos que el Si compone del 22 al 25% del patrimonio suelo, después del oxígeno (O), que forma el 50%.



Una forma de cuantificar si una sustancia es un fuerte agente oxidante, o un fuerte agente reductor, es utilizando el potencial de oxidación-reducción o potencial REDOX. De los agentes reductores fuertes puede decirse que tienen un alto potencial de transferencia de electrones, e^- . Los agentes oxidantes fuertes tienen un bajo potencial de transferencia de electrones (aceptan electrones). Los agentes oxidantes y reductores se producen en parejas, formando cadenas de flujo de e^- , con un agente reductor fuerte junto a un agente oxidante débil y viceversa. Dado que estos procesos implican transferencia de electrones, la medición de la separación de carga resultante puede ser cuantificada por el voltaje medido entre la pareja, electrodo de hidrógeno estándar con 1 molar y 1 atmósfera de presión de hidrógeno en ella. El potencial REDOX del hidrógeno es cero a $\text{pH} = 0$, pero para la cuantificación, se utiliza el hidrógeno un $\text{pH} = 7$, y en esas condiciones su potencial REDOX es -421 milivoltios (mV).

Como una referencia útil, los potenciales REDOX de las parejas que se producen comúnmente en las reacciones bioelectroquímicas pueden dar una idea de su papel en los procesos bioenergéticos. Un número negativo de este potencial indica un agente reductor (alta carga disponible de e^-), mientras que un oxidante fuerte tendrá un potencial REDOX positivo (demanda de e^-). Dado que la obtención de energía útil en un proceso biológico generalmente implica la oxidación de algunos alimentos, se deduce que un gran potencial REDOX negativo, como -320 mV de la nicotinamida adenina dinucleótido NAD^+ , sugiere un papel útil en la producción de un producto reducido, como la $NAD(P)H$. La coenzima $NAD(P)H$ reducida puede ser oxidada para proporcionar energía en los procesos biológicos.

En la siguiente ecuación se ilustra la relación entre pares de moléculas, oxidada (aceptor de e^-) y reducida (donador de e^-); la transferencia de e^- , generalmente es 1.



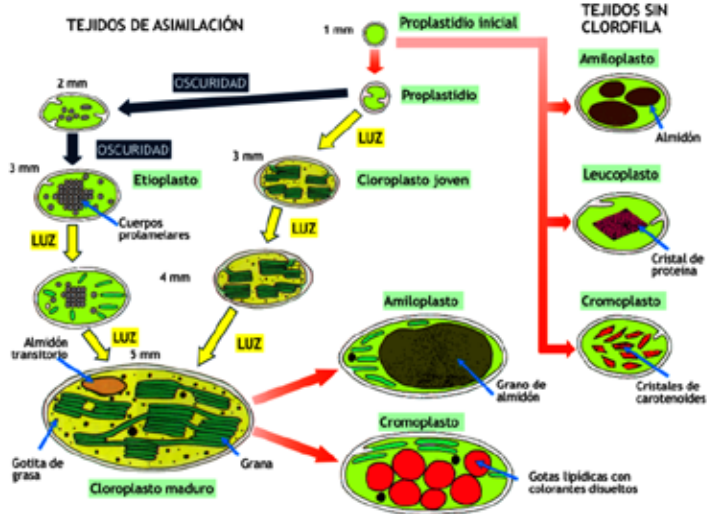
Para iniciar la descripción del flujo de energía y electrones, e^- , en el agroecosistema iniciaremos describiendo a los organelos que participan en la captura de fotones luz y su transformación en e^- , para después comentar cómo se regula este flujo a través de REDOX y ROS, como una forma de regulación de la productividad progresiva y sustentable.

Los plastidios, como organelos responsables de la captura y asimilación de cuantos de luz y su conversión en energía mediada por electrones, e^-

Los plastidios son orgánulos de doble membrana que se encuentran en las células de plantas y algas. Los plastidios son responsables de la captura, transducción y almacenamiento de energía estable a través de carbohidratos (CHO) que se emplean en una cadena *web* como alimento para células y tejidos, permitiendo la actividad metabólica y crecimiento de los organismos. Contienen una amplia estructura de pigmentos que permiten la captura de energía solar, $\lambda_{350-750 \text{ nm}}$, y su regulación a través la óxido-reducción (REDOX) que se realiza en los

fotosistemas PSI y PSII del proceso de fotosíntesis. Los plastidios, según su función, modifican su estructura y pueden ser responsables de que las células y tejidos muestren diferentes colores.

Los plastidios se han clasificado según la presencia o ausencia de pigmentos y cuerpos de carbohidratos; los comunes son: proplastidios, cloroplastos, cromoplastos, gerontoplastos y leucoplastos.



Cloroplastos: dan el color verde a las hojas. Los cloroplastos son los plastidios más conocidos, son responsables de la fotosíntesis (asimilación de luz solar, protones hidrógeno a través de la hidrólisis del agua y asimilación de CO_2). Están cubiertos con tilacoides donde se encuentra el fotosistema PSI y PSII y, con ello, el proceso de fotosíntesis.

Cromoplastos: es un nombre dado a estructuras que sintetizan y conservan diversas moléculas que proporcionan color (pigmentos) a células y tejidos de la planta. Estos se pueden encontrar generalmente en el agroecosistema en las flores, hojas y frutos maduros fisiológicamente. Los cloroplastos se convierten en cromoplastos a lo largo de la maduración y envejecimiento. Los cromoplastos acumulan pigmentos

de dos tipos: 1.- pigmentos carotenoides hidrogenados ($C_{40}H_{56}$); como el β -caroteno, que da el color naranja a la zanahoria. y el licopeno, que da el color rojo al jitomate; 2.- pigmentos carotenoides oxigenados ($C_{40}H_{55}O_2$), como la xantofila, que da el color amarillo a los granos de maíz.

Gerontoplastos: Estos son básicamente cloroplastos que van con el proceso de senescencia, la membrana del tilacoide se rompe, se acumulan plastoglóbulos y la clorofila se degrada. Los gerontoplastos se refieren a los cloroplastos de las hojas que ayudan a comenzar a convertirse en otros organelos cuando la hoja ya no realiza la fotosíntesis, generalmente en el otoño e invierno.

Leucoplastos: estos son los orgánulos no pigmentados que son incoloros. Generalmente se encuentran en la mayoría de las partes no fotosintéticas de la planta, como las raíces. Actúan como almacenes de almidones, lípidos y proteínas, según las necesidades de la planta. Se usan principalmente para convertir aminoácidos y ácidos grasos. Los leucoplastos son de tres tipos: 1.-Amiloplastos: los amiloplastos que acumulan almidón son los principales entre los tres (amiloplastos, proteinoplastos y elaioplastos); 2.- los proteinoplastos ayudan al almacenar las proteínas que una planta necesita y se pueden encontrar normalmente en las semillas; 3.- los elaioplastos ayudan a almacenar grasas y aceites que la planta necesita y pueden encontrarse en abundancia en semillas.

Herencia de plastidios: Hay muchas plantas que heredan los plastidios de un solo padre. La angiosperma hereda los plastidios del gameto femenino, mientras que hay muchas gimnospermas que heredarán los plastidios del polen masculino. Las algas heredan plastidios de un solo padre. La herencia del ADN plastidios parece ser 100% uniparental. En la hibridación, la herencia del plastidios parece ser más errática.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA BIOLÓGICO PARA LA CAPTURA DE CUANTOS DE LUZ



En la figura anterior se destaca la participación del metabolismo del Si biogénico ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) como un agente emergente para el manejo de la captura de energía solar en la productividad de los agroecosistemas.

Características del sistema fotosintético en plantas tipo C3 y C4.

Especies típicas de importancia económica	C3: trigo, cebada, arroz, papa, remolacha azucarera, tabaco, frijol	C4: caña de azúcar, maíz, sorgo, mijo
Primer producto de la asimilación de CO_2	Ácido fosfoglicérico	Ácido oxaloacético
Enzima de la primera carboxilación	RUBISCO	PEP carboxilasa
Energía necesaria para la reducción completa de una mol de CO_2	3 ATP, 2 NADPH	5 ATP, 2 NADPH
Anatomía de la hoja	Envoltura de la vaina vascular ausente o no verde	Envoltura de la vaina vascular con cloroplastos activos

Células involucradas	Células del mesófilo	C4 – células del mesófilo C3 – células de envoltura vascular
Cloroplastos	Similar en todos los tejidos	Di-mórficos con retículo periférico
Fotosíntesis	Saturada a aproximadamente 50% de luz solar completa	No muestra saturación por luz solar
Fotorrespiración	15 a 30% del carbón fijado puede ser perdido	No muestra pérdida de CO ₂ por eflujo
Efectos del oxígeno	Inhibe la fijación de CO ₂	No inhibición de la fijación de CO ₂ por oxígeno
Punto de compensación	40 a 100 ppm CO ₂	0 a 10 ppm de CO ₂
Rendimiento fotosintético, a corto plazo	20 – 30 g m ⁻² día ⁻¹	40 – 50 g m ⁻² día ⁻¹
Productividad anual	10 a 30 ton ha ⁻¹ año ⁻¹	60 a 80 ton ha ⁻¹ año ⁻¹
Resistencia estomática	250 a 500 m ⁻¹ s	50 a 200 m ⁻¹ s
Resistencia mesófilo	300 a 800 m ⁻¹ s	50 a 150 m ⁻¹ s
Temperatura para eficiente fotosíntesis	15 °C a 25 °C	30 °C a 47 °C
Cantidad de agua necesaria para producir 1 g de materia seca	450 – 950 g	250 – 350 g

La composición promedio del sistema fotosintético localizado en los cloroplastos que se encuentran en el follaje del agroecosistema se describe enseguida, como parte fundamental para comprender el proceso biológico que está ligado inexorablemente a la productividad en el planeta Tierra y cuyo manejo permitirá garantizar la disponibilidad de alimentos para el desarrollo sustentable y progresivo de la humanidad.

Análisis promedio, semi cuantitativo, del sistema fotosintético de una hoja de planta tipo C3. Adaptado de: *Photosynthesis; Metabolism, Control and Physiology*, by D W Lawlor. pp 262. Longman Scientific and Technical, Harlow, UK. 1989. Se establece un parámetro de unidades que facilita su extrapolación.

Características de la hoja	
Área de hoja	1 m ²
Espesor de hoja	3 x 10 ⁻⁴ m
Volumen de (1 m ²) de hoja	3 x 10 ⁻⁴ m ³
Peso fresco (1 m ²) de hoja	0.17 kg
Peso seco (1 m ²) de hoja	0.04 kg
Volumen de células (asumiendo la densidad de materia seca = 1.2 x 10 ³ kg m ⁻¹)	2.2 x 10 ⁻⁴ m ³

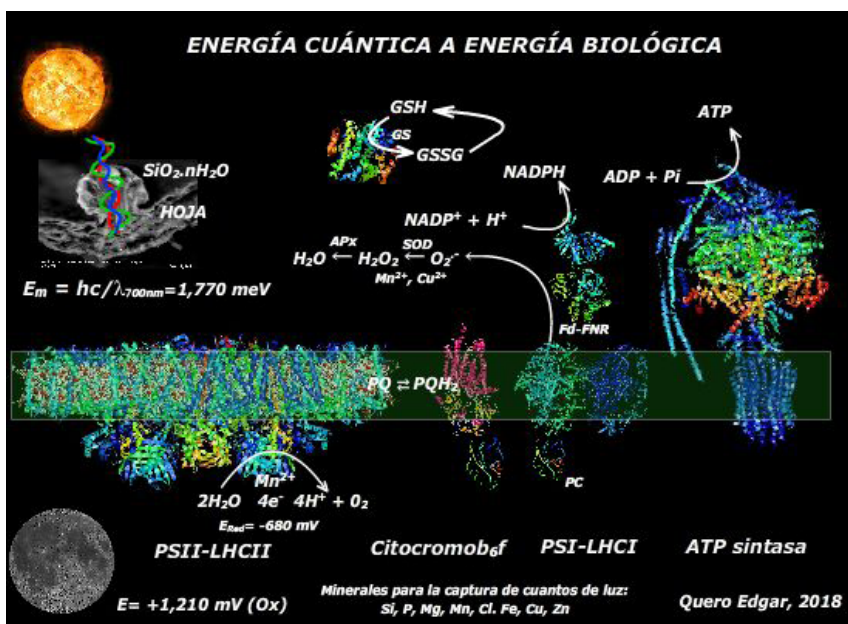
Espacio de aire en hoja = volumen total de células	$2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Como él % de volumen total	27%
Número de células por m² de hoja	
Hoja como: 1 capa de células empalizada del mesófilo en la sección transversal y en la sección paralela, contiene	4×10^9 células
5 capas de células de mesófilo esponjoso en sección transversal y en sección paralela cada capa, contiene	0.6×10^9 células
Número total de células del mesófilo esponjoso	3×10^9 células
Número total de células del mesófilo	7×10^9 células
Volumen celular	
Células en empalizada	
Diámetro promedio	$2 \times 10^{-5} \text{ m}$
Longitud promedio	$8 \times 10^{-5} \text{ m}$
Volumen total (para cilindro con extremos hemisféricos)	$2.9 \times 10^{-14} \text{ m}^3$
Volumen total de todas las células empalizada	$1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Células de mesófilo esponjoso	
Diámetro promedio de células	$3 \times 10^{-5} \text{ m}$
Volumen de células	$1.4 \times 10^{-14} \text{ m}^3$
Volumen total de células de mesófilo esponjoso	$4.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
Volumen total de células de mesófilo	$1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
Cloroplastos en células	
Asumir que cada célula empalizada contiene 100 cloroplastos: Total de cloroplastos m ²	4.0×10^{11}
Asumir que cada célula del mesófilo esponjoso contiene 50 cloroplastos: Total de cloroplastos m ²	1.5×10^{11}
Total, de cloroplastos m ² de hoja	5.5×10^{11}
Cloroplastos	
Diámetro del hemisferio de un cloroplasto	$5 \times 10^{-6} \text{ m}$
Volumen de un cloroplasto	$3.3 \times 10^{-17} \text{ m}^3$
Volumen total de cloroplastos en 1 m ² de hoja	$1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
El cloroplasto ocupa $\approx 8\%$ del volumen celular	
Vacuolas ocupan el 80% del volumen celular, por lo tanto, el volumen del citoplasma es Y los cloroplastos ocupan el 38% del volumen del citoplasma	$4.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ de hoja}$
Área de la cubierta del cloroplasto, cloroplasto ⁻¹	$5.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2$
Área de la cubierta del cloroplasto, m ² hoja	32 m ²
Área de la cubierta del cloroplasto, mg clorofila ⁻¹	0.064 m ²

Volumen total de estroma del cloroplasto	$1.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
Sistema de tilacoides	
Un cloroplasto contiene, en promedio, 60 pilas de la grana y cada uno tiene 15 tilacoides/grana, por ejemplo 30 membranas. Diámetro de una grana extendido es	$4.5 \times 10^{-7} \text{ m}$
Área de vesícula (sin incluir extendido)	$1.6 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
Área total de membranas en una pila	$5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Área total de membranas de la grana en un cloroplasto	$3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Si cuatro tilacoides estromales el ancho de la grana pasa a través del diámetro del cloroplasto, el área del tilacoide estromal es	$2.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Área total del tilacoide, grana + estroma por cloroplasto	$5.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Área total del tilacoide, m^2 de hoja	300 m^2 (otros estimados 855 m^2)
Espesor de las membranas del tilacoide (aproximada)	$7.5 \times 10^{-9} \text{ m}$
Volumen de membranas del tilacoide	$4.1 \times 10^{-18} \text{ m}^3$
Volumen del lumen tilacoidal	
Área de la superficie extendida de una grana	$1.6 \times 10^{-13} \text{ m}^2$
Espacio aproximado entre membranas	$8 \times 10^{-9} \text{ m}$
Volumen de vesícula individual	$1.3 \times 10^{-21} \text{ m}^3$
Volumen del lumen de una pila	$1.9 \times 10^{-20} \text{ m}^3$
Volumen del lumen de la grana en un cloroplasto	$1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^3$
Volumen de estroma tilacoidal, cloroplasto ⁻¹	$9 \times 10^{-10} \text{ m}^3$
Volumen total del lumen tilacoidal, cloroplasto ⁻¹	$2.1 \times 10^{-18} \text{ m}^3$
Volumen total de lumen tilacoidal m^2 de hoja	$1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Volumen total de membrana + lumen en un cloroplasto o ~20% de volumen del cloroplasto	$6.2 \times 10^{-18} \text{ m}^3$
Contenido de clorofila en hojas	
Contenido promedio de clorofila, m^2 de hoja	0.5 g
Masa molecular de clorofila <i>a</i>	894
Contenido de clorofila	$5.6 \times 10^{-4} \text{ mol m}^{-2}$
O	1.9 mol m^{-3} de hoja
Clorofila/cloroplasto	$9 \times 10^{-13} \text{ g}$
O	$1.0 \times 10^{-15} \text{ mol}$
Volumen de lumen tilacoidal (g clorofila) ⁻¹	$2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$
Volumen de cloroplastos (g clorofila) ⁻¹ o vol. mol^{-1}	$3.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$ $0.033 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
Volumen de membrana tilacoidal (g clorofila) ⁻¹	$4.6 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$
Área de membrana tilacoidal (g clorofila) ⁻¹	$600 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (otro estimado $1,670 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)

Concentración de clorofila en tilacoide	$2.2 \times 10^5 \text{ g m}^{-3}$, ó $2.4 \times 10^2 \text{ mol m}^{-3}$ (0.24 M)
Número de moléculas de clorofila, cloroplasto ⁻¹	6.7×10^8
Área de membrana (molécula de clorofila) ⁻¹	$1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$
Área por "cabeza" de molécula de clorofila	$2.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$
Valores diversos	
Moléculas de clorofila por fotosistema I y II	300
Concentración de NADP reductasa en el estroma	$8 \times 10^{-5} \text{ M}$
Factor de acoplamiento (CF_1)	$0.45 \text{ g (g clorofila)}^{-1}$
Masa moléculas de CF_1	325 kD
CF_1 grana ⁻¹	200
Contenido de ATP en cloroplastos iluminados (nm ATP mg clorofila ⁻¹)	40
Contenido de ADP (nm ATP mg clorofila ⁻¹)	12
Concentración de ATP	1.5 mM
Concentración de ADP	0.5 mM
Relación ATP/ADP	3
Concentración de NADPH	0.1 mM
Concentración de sitios de enzima RuBP carboxilasa/oxigenasa	4 mM
Cadenas de transporte de electrones por disco tilacoidal	200
Masa seca por cloroplasto	$20 \times 10^{-12} \text{ g}$
Volumen de agua por volumen total	75%
Contenido de proteína (% de la masa seca del cloroplasto)	60%
Contenido de lípidos (% de la masa seca del cloroplasto)	20%
Clorofila (% de la masa seca del cloroplasto)	4%
Carotenoides (% de la masa seca del cloroplasto)	0.9%
Ácidos nucleicos (% de la masa seca del cloroplasto)	2.5%
Productos solubles de la fotosíntesis	7.5%
Concentración de Mg en estroma de los cloroplastos (luz)	30 mM
Concentración de Mg en estroma de los cloroplastos (obscuridad)	15 mM
Fosfato inorgánico en cloroplastos (moles de P_i mg clorofila ⁻¹)	3
Concentración de fosfato inorgánico	100 mM
Concentración de RuBP	0.1-2 mM

ESTATUS DE LA BIOLOGÍA DEL PLASTIDIO Y EL SISTEMA REDOX

Los cloroplastos son orgánulos específicos de plantas con propiedades importantes, la más destacada es su capacidad para llevar a cabo la fotosíntesis oxigénica. Durante este proceso, la luz, $\lambda_{350-750\text{nm}}$, es absorbida por los fotosistemas I (PSI) y II (PSII) ubicados en la membrana del tilacoide y se emplean para activar el transporte de electrones, e^- , fotosintéticos. El flujo lineal de electrones requiere que ambos fotosistemas funcionen en serie, lo que lleva a la transferencia de electrones desde la hidrólisis del agua ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4e^- + \text{H}^+ + \uparrow\text{O}_2$) a NADP^+ para generar NADPH como potencia reductora y un gradiente de protones (H^+) transtilacoidales que impulsa la síntesis de ATP a través de $\text{CF}_0\text{F}_1\text{ATPasa}$. Esto implica la transferencia de electrones de PSII a PSI a través de plastoquinona (PQ), el complejo de citocromo b_6f , y plastocianina como vehículos REDOX adicionales. En el lado estromal de PSI, los electrones se donan posteriormente a Fdx, que funciona como un transportador móvil de electrones que distribuye electrones a NADP^+ a través de Fdx-NADP-reductasa (FNR) para producir NADPH o directamente a procesos específicos ubicados en el estroma, como la asimilación de S y N, la síntesis de clorofila y ácidos grasos, y las reacciones involucradas en la regulación REDOX de los cloroplastos (el flujo de electrones, e^-) y energía durante la fertilización lumínica. Esta se ilustra en la siguiente figura, tal ocurre en los cloroplastos.



En este último, los electrones se transfieren de Fdx a tiorredoxinas (Trxs) a través de Fdx-Trx-reductasa (FTR). Los Trxs son pequeñas proteínas reguladoras que contienen un grupo disulfuro activo REDOX que controla el intercambio tiol-disulfuro de las proteínas diana. En plantas, Trxs comprende una familia de genes de tamaño mediano con 10 isoformas diferentes (f_{1-2} , m_{1-4} , x , y_{1-2} y yz) que se localizan en el cloroplasto, mientras que otras isoformas están ubicadas en el citosol y mitocondrias. Los estudios *in vitro* que usan proteínas purificadas indican que Trxs *f* y *m* participan en la regulación del metabolismo del estroma, mientras que los tipos *x*, *y* y *yz* sirven como sustratos reductores de las enzimas antioxidantes. Más recientemente, se han utilizado estudios genéticos para analizar más detalladamente los papeles específicos de diferentes Trxs *in vivo*, proporcionando evidencia de diferentes isoformas de Trxs *f* y *m* que tienen diferentes funciones en las plantas.

En algunas plantas, se ha encontrado que el FNR está asociado con las membranas tilacoidales y de la envoltura interna del cloroplasto, además de su ubicación en el estroma soluble. Dos proteínas de unión a FNR han sido identificadas previamente: Tic62, un componente de la maquinaria importadora de cloroplastos, y la proteína TROL intrínseca (proteína tilacoidal tipo rodanasa), que conducen a la unión de FNR a las membranas de envoltura y tilacoides, respectivamente. Se ha encontrado que el reclutamiento de membranas de FNR es regulado por REDOX en respuesta a señales de luz. El papel de la unión a la membrana en la actividad de FNR y la distribución de electrones a las reacciones del estroma, sin embargo, aún no se ha resuelto por completo. Recientemente, una doble mutante, noqueado (KO), combinado de Tic62 y TROL, condujo a la restricción de FNR al estroma soluble, dando como resultado una disminución del nivel de FNR, disminución de la relación NADPH/NADP⁺ y alteración del metabolismo del almidón en las hojas.

A diferencia de la transferencia lineal de electrones, el flujo cíclico de electrones es impulsado por PSI sólo para producir ATP sin generar NADPH. Aquí, los electrones de Fdx se reintroducen en la cadena de transporte de electrones en lugar de distribuirse a los componentes del estroma. Se han identificado dos rutas distintas de flujo cíclico de electrones que implican el complejo proteína-gradiente-regulación-5 / protón-gradiente-regulación-proteína similar 1 (PGRL1) o el complejo similar a NADH deshidrogenasa. Las evidencias muestran que la proteína de membrana tilacoidal transmembrana PGRL1 actúa como una reductasa Fdx-PQ. Es muy probable que la enzima esté regulada por vía REDOX, ya que su actividad requiere varios residuos de cisteína REDOX-activos y está controlada por Trx *m4*, proporcionando un posible mecanismo para vincular el transporte cíclico de electrones y el estado REDOX del estroma. Se requerirá una regulación sensible del flujo de electrones cíclico y lineal para ajustar rápidamente la proporción de producción de NADPH y ATP en respuesta a condiciones de luz fluctuantes y a cambios en las actividades de reacciones estromales

con diferentes requerimientos de ATP y/o NADPH como cofactores. Además de esto, los equivalentes reductores en exceso se pueden exportar al citosol a través de oxaloacetato (OAA), que implica malato deshidrogenasa (MDH) dependiente de NADP REDOX en el cloroplasto y MDH dependiente de NAD en el citosol para la interconversión.

En este sistema de captura de energía solar la participación del hierro como aceptor y donador de electrones es fundamental, como se ilustra en la siguiente tabla:

Proteínas del sistema de asimilación de cuantos de luz que requieren de átomos de hierro en su sitio catalítico.

Proteína o complejo proteico	No. de átomos de Fe
PSII (PSII-LHCII)	2(3)
PSI (PSI-LHCI)	12
Citocromo b6-f	5
Citocromo c6	1
Ferredoxina (Fd)	2
Catalasa	4
Fe superóxido dismutasa (SOD)	1
Ascorbato peroxidasa (APx)	1
NAD(P)H/PQ oxidoreductasa (FNR)	8-18

Así también en la siguiente tabla se enlistan los requerimientos de elementos metálicos en los cloroplastos

Metabolismo de cloroplastos y requerimiento de minerales.

Co, Fe, Mn, Ni	Delta-aminolevulinico dehidratasa. Síntesis delta-aminolevulinico. Porfobilinogenasa
Fe, Mg	Clorofilida a oxigenasa: conversión de Mg-protoporfirina monometil ester en protoclorofilida. Feoforbida a oxigenasa
Mg	Delta-aminolevulinico dehidratasa, Mg-quelato
Biosíntesis Hemo	
Fe	Ferroquelatasa.
Reacciones lumínicas fotosintéticas	

Ca	Ensamble del fotosistema II
Cu	Plastocianina
Fe	Citocromo b6-f, citocromo c6, ferredoxina. NAD(P)H-plastoquinona oxidoreductasa
Mg	ATP sintasa
Mn	H ₂ O oxidasa
Zn	ATP-dependiente Zn-metaloproteasa
Asimilación de CO ₂	
Ca	Zn-proteasa degrada ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa
Mg	Fructosa 1,6-bisfosfato, RUBISCO, sedoheptulosa 1,7-bisfosfato
Mn	Enzima málica
Zn	Anhidrasa carbónica. Zn-proteasa degrada a ribulosa bisfosfato carboxilasa oxigenasa
Sistema antioxidante	
Cu	Cu/Zn-superóxido dismutasa. Metalochaperona de Cu/Zn superóxido dismutasa
Mg	Glutación sintetasa
Mn	Mn-superóxido dismutasa
Zn	Cu/Zn-superóxido dismutasa
Metabolismo del azufre	
Fe	Adenosin-5-fosfato reductasa. Sirohidroclorina ferroquelatasa. Sulfito reductasa
Metabolismo del nitrógeno	
Fe	Amidofosforibosiltransferasa. Glutamina-2-oxo-glutarato amido transferasa. NADH-dependiente glutamina-2-oxo-glutarato amida transferasa. Nitrito reductasa. Sirohidroclorina ferroquelatasa
Mg	Glutamina sintetasa
Metabolismo básico	
Fe	Acetil-coenzima A carboxilasa. Cloroplasto enzima de procesamiento. Enzima involucrada en edición de RNA. Metaloendopeptidasa. Estromal enzima de procesamiento. Zn-dominios de dedo (<i>finger domains</i>)

SUMINISTRO DE ENERGÍA DE REDUCCIÓN POR REACCIONES DE LUZ FOTOSINTÉTICA Y SU DISTRIBUCIÓN

Todo el poder reductor en las células de las plantas se origina, en última instancia, de la transferencia de electrones impulsada por la luz desde el agua hasta el NADP⁺, que es realizada por el aparato fotosintético en el sistema de membrana tilacoide de los cloroplastos. En el transporte de electrones lineal, el centro de reacción de PSII se excita, creando una gran forma de potencial energético (P680 → P680*). Esto es lo

suficientemente fuerte como para iniciar una separación de carga que permite que un electrón se mueva a través de feofitina al primer aceptor de electrones estable QA, una plastoquinona (PQ) unida a la subunidad PSII D2. El espacio de electrones resultante dentro del centro de reacción se cierra con electrones del agua suministrada por el grupo de manganeso del complejo de división de agua. Como subproducto de esta reacción, se libera oxígeno molecular (O_2). Los electrones de QA se transfieren luego a un segundo PQ (QB) unido a la proteína D1 del centro de reacción. Después de recibir dos electrones, se libera la PQ reducida (PQH_2) del PSII y los lleva a otro complejo de membrana, el complejo del citocromo b_6f ($Cytb_6f$). Aquí, PQH_2 se oxida. Este es el paso más lento dentro del transporte de electrones fotosintéticos convirtiendo el conjunto de PQ en un sensor ideal para la excitación desbalanceada de los dos fotosistemas. Los electrones son transferidos por el complejo $Cytb_6f$ a un transportador de electrones lumenal, plastocianina, que transporta los electrones a PSI. En PSI, los electrones están excitados con un potencial de reducción suficiente para reducir (a través de una serie de pasos REDOX) la ferredoxina (Fd) en el lado estromal de PSI. Desde aquí la mayoría de los electrones son transferidos por la enzima Fd-NADP-oxidoreductasa a $NADP^+$ generando $NADPH + H^+$. De esta forma, los electrones cruzan una diferencia de potencial REDOX de aproximadamente 1,130 mV en total, que es lo suficientemente fuerte como para alimentar todas las reacciones posteriores dependientes de REDOX en la célula.

La potencia reductora entregada desde la cadena de transporte de electrones se distribuye principalmente a tres categorías de procesos que están conectados entre sí. Estas son (1) reacciones anabólicas del metabolismo, (2) los sistemas antioxidantes y (3) sistemas reguladores REDOX.

En el metabolismo, la reducción equivalente de NADPH se usa directamente como cofactor en reacciones enzimáticas, en especial en reacciones anabólicas que sintetizan moléculas de mayor complejidad o

contenido energético, por ejemplo, carbohidratos en el ciclo de Benson-Calvin o intermediarios reducidos en el metabolismo de azufre o nitrógeno. Los sustratos reducidos se pueden usar para generar equivalentes de reducción en los tejidos oscuros o no fotosintéticos, lo que permite a la planta desacoplar las reacciones dependientes de REDOX de una conexión directa a las reacciones de luz de la fotosíntesis.

La reducción de los antioxidantes solubles, como el ascorbato o el glutatión, se usa para proteger los componentes celulares contra el daño oxidativo causado por ROS. Estos son subproductos inevitables de la fotosíntesis oxigénica y se generan por fugas incontroladas de electrones, principalmente en PSI. ROS puede generar efectos nocivos y debe desintoxicarse. De ese modo, ROS funciona como desahogos importantes para reducir el poder. Pero ROS también realiza importantes funciones de señalización y desencadena procesos celulares que incluyen respuestas de estrés, defensa de patógenos y muerte celular dirigida que representan campos de investigación importantes en la ciencia de la productividad de las plantas de suyo propio.

El sistema regulador REDOX de una célula vegetal parece ser el más complejo entre las tres categorías dadas de metabolismo REDOX, defensa antioxidante y regulación REDOX. El sistema REDOX consiste en una gran cantidad de diversos componentes que generan una red jerárquica y altamente interconectada.

LA RESPUESTA DE LOS CLOROPLASTOS A LA DEFICIENCIA A METALES

Ejemplos de alteraciones en la estructura de cloroplastos de plantas cultivadas por deficiencia en metales esenciales.

Metal	Especie	Alteración de cloroplastos
Ca	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Ruptura de la membrana de cubierta, baja grana, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.
Cu	Avena (<i>Avena sativa</i>)	Desintegración de membranas del tilacoide, hinchado del espacio intratilacoidal.
Fe	Manzana (<i>Malus domestica</i>)	Desorganizada (dispersa) la grana. Reducido almidón, incremento del número de plastoglóbulos.
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, tilacoides desorganizados, falta de grana.
	Nuez pecanera (<i>Carya illinoensis</i>)	Reducido sistema de membrana interna, deficiente grana, incremento del contenido de almidón, incremento del número de plastoglóbulos.
	Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	Plastidios pequeños, no desarrollados, la grana desorganizada, clúster de vesículas periféricas.
	Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Tilacoides desapilados y difusos, incremento del contenido de almidón, vesículas inusuales.
K	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Rompimiento de grana.
	Maíz (<i>Zea Mays</i>)	No hay alteraciones significantes, membranas carecen de contraste.
Mg	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Grana desorganizada.
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Reducida membrana interna, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.
Mn	Limón (<i>Citrus volkamericana</i>)	Reducido tamaño de cloroplastos y gránulos de almidón, espacios tilacoides ligeramente hinchados.
	Pecanero (<i>Carya illinoensis</i>)	Reducción del número de cloroplastos, no hay aparente cambio en los tilacoides.
	Soya (<i>Glycine max</i>)	Destrucción de tilacoides e hinchamiento del espacio intratilacoidal, fuerte reducción del contenido de almidón, incremento del número de plastoglóbulos
	Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	Destrucción de tilacoides, hinchamiento del espacio intratilacoidal en la grana, aparición de vesículas correspondientes al hinchamiento del espacio del estroma.
Zn	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Limitado desarrollo de la grana.
	Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	Hinchamiento del cloroplasto. Destrucción de la membrana de cubierta, hinchamiento del espacio intratilacoidal, reducción del número de grana, desorganización de los tilacoides, incremento del número de plastoglóbulos.
	Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	Senescencia prematura: Destrucción de tilacoides, desapilamiento de grana, degeneración de componentes del estroma.

Así también, se enlistan las alteraciones que ocurren en los cloroplastos como respuesta a exceso de metales, siendo esta muy variada.

Ejemplos de alteraciones de la estructura de los cloroplastos causados por exceso de metales en cultivos.

Metal	Especie	Alteraciones de los cloroplastos.
Al	Pasto de trigo (<i>Thinopyrum bessarabicum</i>)	Hinchamiento y distensión de los cloroplastos, arreglo en líneas arqueadas de la grana.
Cd	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Algunas veces, la destrucción de la cubierta, desordenada posición y apilamiento de los tilacoides, incremento del número y tamaño de los plastoglóbulos.
	Colza oleaginosa (<i>Brassica napus</i>)	Reducido número de cloroplastos, ligera reducción del tamaño de la grana, reducido número de plastoglóbulos, pero no sorprendentes efectos estructurales.
	Chicharo (<i>Pisum sativum</i>)	Reducido número de cloroplastos, senescencia (desorganización de la grana, incremento del contenido de almidón, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos).
	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	Hinchamiento de espacio intratilacoidal, senescencia (desorganización de la grana, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos).
		Forma distorsionada de los cloroplastos, hinchamiento del espacio intratilacoidal.
	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Senescencia (distorsión de la forma tilacoidal, hinchamiento del espacio intratilacoidal), regular manchado de cuerpos.
Cr(III)	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	No efecto estructural.
Cr(VI)	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Forma redonda del cloroplasto ligeramente distorsionada, reducción de la grana en los tilacoides, hinchamiento del espacio intratilacoidal.
Cu	Trigo duro (<i>Triticum durum</i>)	Hinchamiento el espacio intratilacoidal, regularmente cuerpos moteados.
	Orégano (<i>Origanum vulgare</i>)	Reducido en número y tamaño de los cloroplastos, cubierta dilatada, no gránulos de almidón, incremento del tamaño de los plastoglóbulos.
	Frijol enredadera (<i>Phaseolus coccineus</i>)	Senescencia (desorganización de la estructura de los cloroplastos, distorsión de lámina del estroma).
	Soya (<i>Glycine max</i>)	Pequeños, pero numerosos cloroplastos, con forma redondeada, densas estructuras membranales internas (incremento del tamaño de la grana y apilamiento).
	Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	Degradación de las pilas de la grana y lamina del estroma, ligeramente hinchado el espacio intratilacoidal, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos).
	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Reducido número y tamaño de cloroplastos, sistema de membrana interna menos desarrollada, formación de la grana dañada, reducción del contenido de almidón, reducción del número de plastoglóbulos.
Fe	Soya (<i>Glycine max</i>)	Aparición de ferritina.

Mn	Limón (<i>Citrus volkameriana</i>)	Cloroplastos más redondeados con ligero incremento del tamaño, reducido número de grana, incremento del contenido de almidón, incremento en número y tamaño de plastoglóbulos, incremento de materiales oscuros en tilacoides.
	Maple (<i>Hacer saccharum</i>)	Discreta densidad de electrones en las membranas tilacoidales de los cloroplastos, incremento del contenido de almidón.
	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.
Na	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, incremento del número de plastoglóbulos en cloroplastos cotidionales.
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.
	Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Incremento del número de plastoglóbulos.
	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, destrucción de la membrana de cubierta, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.
	Papa dulce (<i>Ipomea batatas</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, destrucción de la membrana del tilacoide.
	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Diferencias específicas entre genotipos en la cubierta de los cloroplastos (más redondeados y alargados) y número, en el contenido de almidón y plastoglóbulos, sistema de membranas internas menos organizadas.
	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Hinchamiento del espacio intratilacoidal, acumulación de almidón.
Ni	Repollo (<i>Brassica oleracea</i>)	Reducido número de grana, alteraciones en el tamaño y forma de los tilacoides, hinchamiento del espacio intratilacoidal, incremento del contenido de almidón, incremento del tamaño de plastoglóbulos.
Pb	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	Menos, pero más elongada grana, incremento del contenido de almidón, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos, depósitos oscuros en los márgenes de la grana, cuerpos oscuros regulares.
	Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Algunas veces, destrucción de la cubierta, depósitos oscuros en los márgenes de la grana.
	Soya (<i>Glycine max</i>)	Destrucción de la cubierta, reducido sistema laminar, desorganización de tilacoides.
Zn	Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Desintegración de estroma de tilacoides, con incremento de concentraciones: reducido número de grana, hinchamiento del espacio intratilacoidal, sin almidón, incremento del número y tamaño de plastoglóbulos.

LAS ESPECIES REACTIVAS DE OXÍGENO, ROS, EN EL METABOLISMO VEGETAL

Especies de oxígeno reactivo (ROS) es un término colectivo para las formas reactivas de oxígeno, que incluyen el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), anión superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), oxígeno singulete ($^1\text{O}_2$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Las ROS pueden reaccionar con una amplia gama de biomoléculas, que incluyen proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Curiosamente, la oxidación de las biomoléculas no sólo daña las células, sino que también se usa para la transducción de señales. A diferencia de las células animales, las células vegetales contienen cloroplastos donde tiene lugar la fotosíntesis, y una pared celular circundante que no sólo proporciona estabilidad mecánica, sino que también forma el apoplasto donde los solutos pueden difundirse de una célula a otra. En todas las células eucariotas, las ROS se producen además en mitocondrias y peroxisomas. En las plantas, sin embargo, la fotosíntesis es una fuente continua y rica de ROS, que emplea mucha energía que puede derivar en la producción de ATP. Por lo tanto, como organismos fotoautótrofos sésiles, las plantas están destinadas a generar ROS en múltiples procesos.

Agobiados por los oxidantes de los cloroplastos, los peroxisomas, las mitocondrias y el apoplasto, las plantas han desarrollado mecanismos sofisticados que controlan ROS y sus propiedades perjudiciales. Este control se extiende más allá de la mera desintoxicación: la producción de ROS específicas en contextos específicos ha brindado amplias oportunidades para la evolución de los mecanismos de señalización que involucran ROS.

Especies reactivas de oxígeno

$\cdot\ddot{\text{O}}\cdot$ O_2 Oxígeno

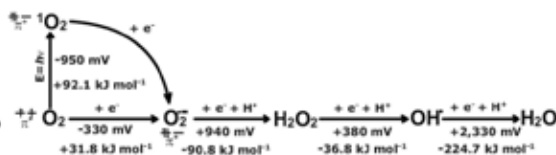
$\cdot\ddot{\text{O}}\cdot$ $\text{O}_2^{\cdot-}$ Anión superóxido

$\cdot\ddot{\text{O}}\cdot$ O_2^2 Peróxido

$\text{H}\ddot{\text{O}}\ddot{\text{O}}\text{H}$ H_2O_2 Peróxido de hidrógeno

$\cdot\ddot{\text{O}}\text{H}$ $\cdot\text{OH}$ Radical hidroxilo

ESPECIES REACTIVAS DE OXIGENO. ROS



Las especies de oxígeno reactivo (ROS, por ejemplo, $O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 , $OH^{\cdot}$, 1O_2) son formas parcialmente reducidas o excitadas de oxígeno atmosférico. Funcionan en las células como moléculas de señalización, pero también se consideran los inevitables subproductos tóxicos del metabolismo aeróbico. Es muy probable que ROS apareciera en la Tierra junto con las primeras moléculas de oxígeno atmosférico hace unos 2,400 a 3,800 millones de años (unos mil años después de formado el planeta), y ha sido un compañero constante de vida aeróbica desde entonces. Teniendo en cuenta las condiciones altamente reductoras y los altos niveles de hierro y azufre soluble (reducido) en los océanos primordiales, es posible que la mayor parte del oxígeno atmosférico producido inicialmente por los sistemas biológicos en la Tierra se convirtiera casi inmediatamente en ROS o alguna otra forma de intermedio o radical derivado de oxígeno. El descubrimiento de que la enzima captadora de ROS superóxido dismutasa (SOD) se encuentra en todos los reinos de la vida, y ha evolucionado incluso antes de la diferenciación de las eubacterias de las arqueas, apoya firmemente esta posibilidad. Por lo tanto, la evolución de la vida aeróbica en la Tierra se produjo en presencia de ROS, y este hecho debe tenerse en cuenta cuando consideramos los roles que desempeña ROS actualmente en diferentes sistemas biológicos. Como moléculas de señalización, las ROS son muy versátiles debido a sus diversas propiedades, que incluyen diferentes niveles de reactividad, sitios de producción y potencial para atravesar las membranas biológicas. Lo más probable es que se utilizaron por primera vez por las células como moléculas de señalización para detectar niveles inseguros de oxígeno atmosférico o para controlar diferentes reacciones metabólicas, pero desde entonces han evolucionado para regular casi todos los aspectos de la vida de las plantas, los animales y la mayoría de los organismos eucarióticos. En plantas superiores, por ejemplo, se descubrió que las ROS regulan el desarrollo, la diferenciación, los niveles REDOX, la señalización del estrés, las interacciones con otros organismos, las respuestas sistémicas y la muerte celular. Como subproductos tóxicos del metabolismo aeróbico, las ROS se forman principalmente

en cloroplastos, mitocondrias y peroxisomas, pero también en cualquier otro compartimento celular que incluya proteínas o moléculas con un potencial REDOX suficientemente alto para excitar o donar un electrón al oxígeno atmosférico. Luego son eliminadas o desintoxicadas por una serie de enzimas antioxidantes y moléculas antioxidantes. Este proceso de producción de ROS como un subproducto del metabolismo aeróbico, junto con la eliminación de ROS por mecanismos antioxidantes celulares, ocurre constantemente en las células para prevenir algunos de los posibles efectos tóxicos de ROS que podrían incluir DNA, RNA, proteína y oxidación y daño de la membrana (denominados colectivamente estrés oxidativo). Los numerosos sistemas antioxidantes de la célula mantienen por lo tanto ROS en un nivel basal no tóxico, y cualquier desviación de este el equilibrio podría usarse para las reacciones de señalización de ROS. Por ejemplo, se conoce que en estado estable la concentración de H_2O_2 en cloroplastos es de $0.5 \mu M$, y en condiciones de agobio esta puede crecer de 1 a $15 \mu M$. Asimismo, el radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$) pasa de 240 a $720 \mu M s^{-1}$. La capacidad para producir H_2O_2 en los organelos es: mitocondria, $190\sim 210$, cloroplastos, $4,030$, y peroxisomas, $10,000 nM m^{-2} s^{-1}$, por ello su importancia en la señalización para una pronta respuesta ante eventos de agobio bióticos y abióticos.

ROS COMO UN MEDIO DE RESILIENCIA EN EL AGROECOSISTEMA

Los agroecosistemas están cada vez más sujetos a una variedad de tensiones ambientales que disminuyen la productividad limitando el desarrollo de la cadena alimentaria (*web*). Cada año, el mundo pierde una gran cantidad de producción de cultivos debido a la escasez de agua, las temperaturas extremas, el estado oxidado y la alta salinidad del patrimonio suelo, el ataque de herbívoros y la infección de patógenos.

La naturaleza sésil de las plantas ha resultado en la evolución de mecanismos de protección complicados para sobrevivir a diferentes desafíos ambientales. Uno de los mecanismos de tolerancia al estrés es

la capacidad de detectar factores de estrés complejos y responder adecuadamente. La activación de rutas de señalización complejas ayuda a los agroecosistemas a lograr esto. Comprender mejor las vías de señalización nos permitiría inducir la expresión ortogénica de las plantas para mejorar su adaptabilidad. Sin embargo, esto requiere reducir la complejidad asociada con las vías de señalización. Centrarse en los puntos en los que convergen diferentes vías de señalización, en lugar de estudiar las derivaciones de estas vías, sería útil como punto de partida. La generación rápida de especies de oxígeno reactivo (ROS) representa una respuesta vegetal común a diferentes estreses bióticos y abióticos, por lo tanto, una base para unificar eventos de señalización.

Las tecnologías genómicas recientes, especialmente las herramientas globales de expresión génica no sólo han producido nuevos detalles sobre las vías de señalización de las plantas, sino que también han planteado muchas cuestiones históricas, entre ellas las siguientes: ¿Existe una vía de señalización lineal específica para cada estrés? Si es así, ¿qué hay de la diafonía observada? ¿Existe una gran red de señalización común de la cual surgen muchas ramas para la especificidad? Si es así, ¿qué hay de los diferentes receptores? ¿Qué representan los puntos en los que convergen las diferentes ramas de las vías de señalización? Si ROS está en los puntos de integrar salidas de señalización de diferentes vías de señalización, entonces, ¿qué son los receptores ROS? ¿Cuáles son los componentes de señalización en sentido ascendente y descendente de ROS? ¿Cómo establece ROS la especificidad de señalización? ¿Qué pasa con la maquinaria fotosintética que genera ROS?, y ¿su sistema ROS y REDOX representan una fuente primaria de la respuesta de señalización de la planta? La mayoría de estas preguntas tienen una respuesta, y estaremos en una mejor forma para proporcionar respuestas más definitivas a las restantes en el futuro cercano.

Este texto presenta una discusión sobre estas cuestiones históricas al considerar la naturaleza tan compleja de las redes de señalización de estrés de la planta y agroecosistema. Se presta especial atención a los

procesos de señalización y eventos tales como receptores/sensores, mensajeros secundarios, especificidad, diafonía, redundancia, regulaciones de retroalimentación, uso de promotores alternativos, empalme alternativo, tráfico nucleocitoplásmico y epigenética. Se presentará un pensamiento específico sobre las actividades fotosintéticas y ROS como fuente primaria de la respuesta de señalización en las plantas. Como la producción de ROS representa una respuesta común de la planta a casi todos los agobios ambientales, aquí se hará especial hincapié en la producción de ROS, eliminación de residuos, efectos perjudiciales, funciones de señalización y cómo funcionan otros componentes de pre y post señalización, por ejemplo, calcio, homeostasis, REDOX, membranas, proteínas G, hormonas vegetales; tales como ácido salicílico (SA), ácido jasmónico (JA), ácido abscísico (ABA) y etileno (ET) y factores de transcripción (TF). Esperamos presentar una sinopsis holística de varios componentes y conceptos de señalización que son importantes para que un biólogo vegetal los tenga en cuenta al analizar los eventos de señalización involucrados en la respuesta de la planta al entorno en constante cambio. Esta comprensión ayudaría a construir redes de señalización integrales, que a su vez innovarán estrategias para mejorar la productividad de la planta bajo la creciente severidad de las condiciones de estrés ambiental y la alta demanda global de alimentos y energía.

PRODUCCIÓN DE ESPECIES REACTIVAS DE OXÍGENO (ROS) EN LAS CÉLULAS VEGETALES

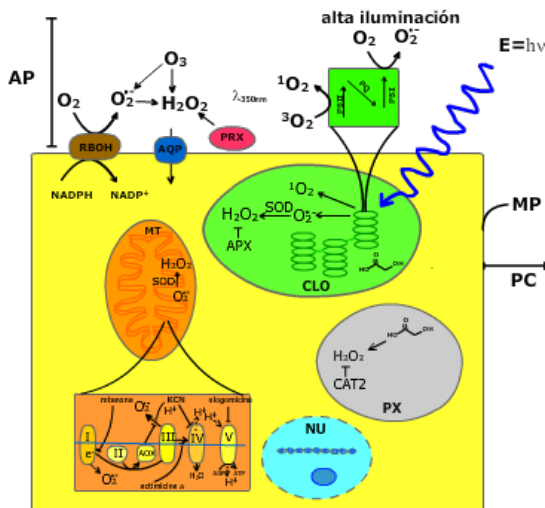
La pared celular fuera de la membrana plasmática es una parte integral de la célula vegetal. Proporciona no sólo soporte mecánico, sino también un marco para una matriz acuosa que permite la difusión de célula a célula y aire. Este espacio de difusión se llama apoplasto, mientras que el simplasto consiste en el área dentro de la membrana plasmática. Dado que el apoplasto es la primera superficie de contacto para las sustancias que entran en la hoja, muchas perturbaciones ambientales afectan primero al apoplasto. Los patógenos que buscan infectar la planta entran primero en contacto con el apoplasto. Las

moléculas de señalización para comunicación de célula a célula y de planta a planta pueden difundirse en el apoplasto. Por lo tanto, no es sorprendente que la membrana plasmática tenga cientos de proteínas receptoras de membrana con dominios sensoriales que residen en el lado del apoplasto.

La producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) en células vegetales. En el apoplasto, las ROS se producen por NADPH oxidasas unidas a la membrana plasmática (RBOH). Los RBOH producen $O_2^{\cdot-}$, que posteriormente se dismuta en H_2O_2 . Además, el H_2O_2 se produce mediante apoplasmático PRX. El H_2O_2 puede transportarse a través de la membrana plasmática al citosol por canales específicos, acuaporinas (AQP) y proteínas de bajo peso molecular, las cuales también pueden estar involucradas en los mecanismos de señalización. Experimentalmente, la producción de ROS apoplasmático se puede generar mediante la aplicación de gas O_3 o sistemas enzimáticos (xantina/xantina oxidasa o glucosa/glucosa oxidasa). En el cloroplasto, el $O_2^{\cdot-}$ se produce en PSI, mientras que el 1O_2 se produce a partir del 3O_2 en el estado base en el PSII cuando el grupo PQ está muy reducido. La producción de ROS en ambos fotosistemas puede aumentarse mediante la exposición a condiciones de estrés ligero. El herbicida conocido como paraquat altera el transporte de electrones en PSI, lo que lleva a la producción de $O_2^{\cdot-}$. La mutación “flu” conduce a una mayor producción de 1O_2 en PSII cuando las plantas adaptadas a oscuridad se transfieren a la luz. La interrupción del APX estromal o tilacoidal conduce a la acumulación de H_2O_2 en el cloroplasto. El glicolato se forma durante la fotorrespiración en el cloroplasto y se transporta a los peroxisomas, donde conduce a la producción de H_2O_2 . El principal secuestrante de H_2O_2 en los peroxisomas es CAT2. En las mitocondrias, las ROS, en particular el $O_2^{\cdot-}$, se producen en diversos lugares de las cadenas de transporte de electrones. $O_2^{\cdot-}$ se dismuta con una SOD mitocondrial en H_2O_2 . Diferentes productos químicos, incluyendo rotenona, antimicina A y oligomicina, aumentan la producción de ROS mitocondrial al inhibir varios complejos de cadena de transporte de electrones mi-

tocondriales. La producción de ROS mitocondrial también puede ser inducida por paraquat.

LA PRODUCCIÓN DE ROS EN CÉLULAS VEGETALES POR: CLOROPLASTOS, MITOCONDRIAS Y PEROXISOMA



AP, apoplasto; PM, membrana plasmática; PC, pared celular; MT, mitocondria; CLO, cloroplasto; PX, peroxisoma; NU, núcleo; AOX, oxidasa alternativa; KCN, cianuro de potasio; ROS, especies reactivas de oxígeno; O_2^- , superóxido; H_2O_2 , peróxido de hidrógeno; PRXs, peroxidasas; AQP, acuaporinas; O_3 , ozono; PSI, fotosistema I; 1O_2 , oxígeno singlete; 3O_2 , oxígeno triplete; PSII, fotosistema II; PQ, plastoquinona; APX, ascorbato peroxidasa; CAT2, catalasa2; SOD, superóxido dismutasa; RBOH, homólogo de la explosión oxidasa respiratoria.

CONTROL METABÓLICO DE REDOX Y CONTROL DEL METABOLISMO EN LAS PLANTAS

El estado de reducción-oxidación (REDOX) opera como un integrador principal del metabolismo subcelular y extracelular y simultáneamente está regulado por procesos metabólicos. El estado REDOX no sólo domina el metabolismo celular debido a la prominencia de las parejas de NAD(H) y NADP(H) en innumerables reacciones metabólicas, sino que también actúa como una señal efectiva que informa a la célula de las condiciones ambientales predominantes. Después de retransmitir

esta información, la célula puede responder adecuadamente a través de una gama de mecanismos, que incluyen afectar directamente el funcionamiento celular y reprogramar la expresión del gen nuclear por medio del metabolismo carbón-uno (C1) mediado por S-adenosilmetionina (SAM). La accesión fácil de mutantes KO (noqueado), unida a la adopción de enfoques postgenómicos a gran escala, puede proporcionar información transcriptómica, proteómica y de nivel metabolómico junto con técnicas de bioquímica celular emergentes y tradicionales, que han avanzado espectacularmente la comprensión del control del estado REDOX.

En el control de estado REDOX del metabolismo y el control metabólico del estado REDOX a nivel celular y subcelular, se está volviendo evidente que las funciones de los plastidios, las mitocondrias y los peroxisomas influyen en una amplia gama de procesos fuera de los propios organelos. Si bien el conocimiento de la red de vías metabólicas y su regulación del estado REDOX intraorganelo ha aumentado en los últimos años, se sabe poco sobre las señales REDOX interorganelo que coordinan estas redes. Un desafío actual es, por lo tanto, sintetizar nuestros conocimientos y experimentos de planificación que aborden la regulación del estado REDOX tanto a nivel intracelular como extracelular. Las herramientas emergentes permiten una resolución espacio-temporal cada vez mayor del metabolismo y la obtención de imágenes de los componentes del estado REDOX. La aplicación más amplia de estas herramientas probablemente mejorará en gran medida nuestra comprensión de la interacción del estado REDOX y el metabolismo, y permitirá elucidar y definir las características de señalización de estas. Planteamos que dicha información permitirá diseccionar las jerarquías reguladoras que median en el estricto acoplamiento del metabolismo y el estado REDOX que, en última instancia, determina el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La química REDOX es una parte intrínseca del metabolismo de las plantas. El estado REDOX celular se determina por oxidación o re-

ducción de diversas especies REDOX activas, que están implicadas en un gran número de reacciones metabólicas. En el cloroplasto, los reductores como la ferredoxina (Fdx) y el NADPH son producidos por la cadena fotosintética de transporte de electrones, y junto con el ATP, utilizado para generar azúcares fosfatados, aminoácidos y muchos otros metabolitos que se suministran al resto de la célula. Además de esto, el metabolismo de NADPH está involucrado en procesos centrales como la glucólisis, la fermentación y la ruta oxidativa de la pentaosa fosfato (OPP) en el citosol, el ciclo del ácido tricarboxílico (TCA), el transporte de electrones respiratorios y los procesos biosintéticos en las mitocondrias y fotorrespiración en plastidios, mitocondrias y peroxisomas.

Además de ser una parte intrínseca del metabolismo, el estado REDOX desempeña un papel activo en la regulación metabólica. En este sentido, el estado REDOX opera como un integrador principal del metabolismo celular y se regula simultáneamente por procesos metabólicos. Esto permite el reajuste de las rutas metabólicas globales y la homeostasis del estado REDOX en respuesta a cambios en las condiciones ambientales, que incluyen la reprogramación de la expresión génica y la modificación postraducciona de las enzimas diana mediante modulaciones de tiol-disulfuro (ante ello el metabolismo del azufre resulta también crucial en los mecanismos de señalización). Las vías de señalización subyacentes sólo se han descubierto parcialmente en los años anteriores. Si bien se sabe mucho sobre las señales de estado REDOX involucradas en la activación de la luz de los procesos fotosintéticos, se sabe poco sobre la regulación REDOX de otras vías metabólicas en el plastidio y del metabolismo extraplastidial. Si bien estudios recientes proporcionan evidencia de la existencia de señales REDOX que coordinan el metabolismo y la expresión génica entre diferentes orgánulos, como el plastidio, la mitocondria y el núcleo, su naturaleza aún no ha sido aclarada.

El control de estado REDOX del metabolismo y el control metabólico del estado REDOX a nivel celular y subcelular, se concentran principalmente en los mecanismos postraduccionales. A pesar de la vastedad de la investigación sobre la expresión génica regulada por el estado REDOX, sólo mencionamos el hecho. En la primera parte, los procesos metabólicos relacionados con el estado REDOX se describen dentro de su contexto subcelular, con respecto a las propiedades reguladoras del estado REDOX y las señales intraorgánicas implicadas en su coordinación. En este sentido, nuestro enfoque principal se centra en organelos como plastidios, mitocondrias y peroxisomas, y los lectores son referidos a otras revisiones exhaustivas para obtener detalles sobre aspectos citosólicos y apoplásticos del estado REDOX.

La producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS) ocurre rápidamente en respuesta a la invasión de patógenos potenciales de plantas hospedantes. Tales cambios de reducción-oxidación (REDOX) son detectados y transmitidos para comprometer la función inmune, incluyendo la respuesta hipersensible, una ejecución programada de células de plantas agobiadas. Los activadores de patógenos desencadenan cambios en el calcio que son detectados por la calmodulina, las proteínas similares a la calmodulina y las proteínas quinasas dependientes del calcio, que activan la producción de ROS y RNS. La producción de ROS y RNS está compartimentada dentro de la célula y ocurre a través de múltiples rutas. Las cascadas de proteína quinasa activada por mitógeno (MAPK) se emplean antes y después de la producción de ROS y óxido nítrico (NO). El NO se reconoce cada vez más como una molécula de señalización clave, que regula la respuesta inmune.

Las plantas responden al ataque de patógenos activando una plétora de respuestas de defensa, que incluyen el cierre de estomas, el fortalecimiento de las paredes celulares y la síntesis de compuestos antimicrobianos como fitoalexinas y proteínas relacionadas con la patogénesis (PR) para limitar el daño y evitar una mayor propagación. Una ca-

racterística destacada de estas respuestas a la activación paralela es la generación de especies de oxígeno reactivo (ROS).

En el sistema inmune de la planta se desencadena el reconocimiento de patrones moleculares asociados a microbios o patógenos (MAMP/PAMP) por un receptor de reconocimiento de patrones dado. La inmunidad desencadenada por MAMP/PAMP (o resistencia basal) es el resultado. Los patógenos exitosos pueden subsistir a esta respuesta inmune temprana mediante el uso de un conjunto de proteínas efectoras entregadas en células huésped potenciales, lo que resulta en susceptibilidad desencadenada por efectores. En respuesta, las plantas han desarrollado una gran cantidad de proteínas de resistencia (R) que pueden reconocer un efector patógeno pues da como resultado una inmunidad desencadenada por efectores (ETI) altamente específica.

La respuesta de hipersensibilidad (HR), una forma de muerte celular programada, es parte de ETI. En la FC, la muerte celular limitada ocurre cerca del punto de invasión, restringiendo la propagación de patógenos. Es importante destacar que la acumulación de ácido salicílico (SA), que precede a la FC, activa una vía de transducción de señal molecular marcada por la inducción de proteínas PR y el posterior desarrollo de resistencia adquirida sistémica (SAR). La SAR prepara respuestas inmunes posteriores en toda la planta contra una amplia gama de patógenos.

Dado que las plantas carecen de células de defensa móviles, la inmunidad innata de cada célula y la transducción efectiva de señal de las células infectadas son fundamentales para la activación de los genes de defensa en los tejidos proximales y distales. Un cambio en el estado de reducción-oxidación celular (REDOX) es una de las respuestas más tempranas detectadas en la célula expuesta. La producción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), una especie de oxígeno reactivo (ROS) y óxido nítrico (NO), una especie de nitrógeno reactivo (RNS) se desencadena rápidamente después de la detección de un patógeno y puede activar sinérgicamente la HR. Una ráfaga masiva de H_2O_2 en ausencia de NO

induce sólo una FC débil en algunas plantas, y NO, si no fue precedida por la producción de H_2O_2 , no invocó la FC. Curiosamente, sin embargo, niveles elevados de S-nitrosotiol (SNO) conducen a la muerte celular en ausencia de síntesis de ROS plastidio. Además, la producción de H_2O_2 y NO conduce a la activación de genes de defensa complementarios, lo que subraya la especificidad de estos intermedios reactivos e implica más cambios REDOX como fundamentales para el desarrollo de la respuesta inmune de la planta. La producción de ROS y RNS y la señalización afín son complejas; aquí sólo se proporciona una breve descripción de la regulación REDOX en la inmunidad de las plantas. Explicaremos cómo, después de la percepción del patógeno, se generan ROS y RNS y cómo se detectan estos cambios REDOX y las señales transducidas para dar como resultado la activación de los genes relacionados con la defensa.

Un marco conceptual para las interacciones entre el concentrador de señalización REDOX celular y la red de señalización de fitohormonas que controla el crecimiento y desarrollo de la planta para maximizar la productividad de la planta en situaciones sin estrés, limitando el crecimiento y alterando el desarrollo de la exposición al estrés: Las señales oxidativas o los ciclos de oxidación y reducción son cruciales para el alivio de la latencia y la inactividad, activan el ciclo celular y desencadenan el control genético y epigenético que sustentan las respuestas de crecimiento y diferenciación a las cambiantes condiciones ambientales. El concentrador de señalización REDOX interactúa directamente con la red de fitohormonas en el control sinérgico del crecimiento y su modulación en respuesta al estrés ambiental, pero se han identificado algunos componentes. La acumulación de pruebas apunta a una interacción compleja de controles de fitohormonas y REDOX que operan en múltiples niveles. Se han identificado las múltiples funciones de las especies reactivas del oxígeno en el control del crecimiento y desarrollo de las plantas, pero ahora se debe poner mayor énfasis en las funciones de las proteínas reguladas por REDOX, junto con los roles centrales de los reductores como el NADPH, tiorredoxinas, glutatión,

glutarredoxinas, peroxirredoxinas, ascorbato y ferredoxina reducida en la regulación de los factores genéticos y epigenéticos que modulan el crecimiento y el vigor de las plantas de cultivo, particularmente dentro de un contexto agrícola.

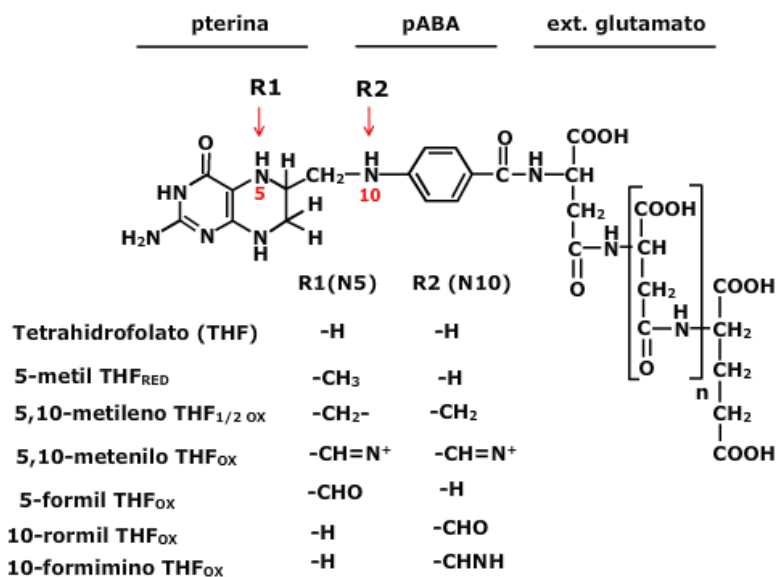
La formación de órganos en las plantas consiste en una fase inicial de proliferación celular y morfogénesis primaria, seguida de una segunda fase de expansión celular, morfogénesis secundaria y endorreduplicación. La orquestación de la formación de órganos es compleja, involucra una amplia gama de genes que promueven o inhiben las vías o procesos de los componentes. Si bien los componentes que controlan la maquinaria del ciclo celular vegetal se han identificado en las plantas, se sabe relativamente poco sobre cómo pueden verse influenciados por los controles REDOX. Sin embargo, la evidencia acumulada indica que la proliferación celular y las actividades de los meristemas de los retoños y las raíces están influenciadas por el estado REDOX celular. Los controles REDOX desempeñan un papel clave en la regulación de la progresión del ciclo celular. La oxidación del citosol ocurre en una etapa temprana en la progresión del ciclo celular. Se sugiere que el control del crecimiento dependiente de REDOX implica una red de interacciones entre especies de oxígeno reactivas (ROS, también llamadas especies de oxígeno activo), antioxidantes y fitohormonas como auxinas y citoquininas, que son reguladores principales del ciclo celular de la planta. Los cambios de desarrollo pleiotrópicos observados en las plantas que son deficientes en oxidasas de NADPH (también llamados homólogos de oxidasa respiratoria [RBOH]) implican defectos en las respuestas de auxina y estrigolactona (SL). Aunque las funciones de muchas de estas formas de NADPH oxidasa aún no se han caracterizado, se considera que RBOHC es importante en el control del crecimiento de la raíz absorbente. De manera similar, las subunidades mediadoras transcripcionales, fitocromo y tiempo de floración 1/mediador 25 (PFT1 / MED25) tienen un papel crucial en la formación del pelo radicular activando un subconjunto de peroxidasas de clase III productoras de peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

Las fitohormonas como la auxina, el ácido abscísico (ABA), el ácido salicílico (SA) y los brasinoesteroides producen H_2O_2 a través de la activación de NADPH oxidasas durante la transducción de señales. La producción de H_2O_2 como resultado de la acción de las fitohormonas se considera una señal de oxidación amplificadora. En este sistema, la oxidación celular potenciada, ocurre una desencadena la señalización de SA y jasmonato (JA). SA, a su vez, induce un aumento rápido en la actividad de NADPH-oxidasas, lo que resulta en la producción de ROS y conduce a una mayor oxidación celular. Este proceso y los cambios asociados en la señalización de Ca^{2+} y las cascadas de proteína quinasas activadas por mitógeno (MAPK) conducen a respuestas adaptativas en el crecimiento, así como en respuestas de estrés biótico y abiótico. Aquí, la evidencia apoya la opinión de que los pasos dependientes de la oxidación-reducción son importantes en el control del desarrollo de los órganos de la planta, con referencia específica a la raíz y los retoños.

EL METABOLISMO DEL CARBÓN-UNO (C1)

El metabolismo del carbón-uno (C1) ocurre en las plantas y en él participan la mitocondria, peroxisomas y cloroplastos. Aquí sólo mencionaremos las acciones fundamentales de este metabolismo. El tetrahidrofolato (THF), comúnmente denominado como fólico, es metilado en la mitocondria, para lo cual dos moléculas de glicina reaccionan formando serina y donando un metilo que es aceptado por el THF, y forman 5-metil THF (esta molécula es reducida y es activa en estado REDOX reducido). Después la serina se puede descarboxilar y liberar CO_2 más etanolamina. La etanolamina puede ser metilada por la acción de la S-adenosilmetionina (SAM) que dona tres metilos y forma la colina; esta a su vez puede ser acetilada por la acetilcoenzima A (Acetil-CoA) y formar la acetilcolina, un importante mensajero. La colina es importante en los lípidos de la membrana y pared celular. Por otro lado, el metabolismo del azufre se desarrolla en los cloroplastos y por ello las evidencias indican que ahí se produce metionina, aunque no es exclusivo. SAM participa en la regulación de la expresión de se-

ñales, ya que está presente en la expresión diferencial de genes por la metilación de histonas y el nucleótido citocina; ello muy posiblemente está relacionado con la expresión ortogenética de las plantas que forman el ecosistema. Adicionalmente, SAM, por la acción de metilación, regula la actividad metabólica de proteínas, flavonoides y esteroides. Por otro lado, la molécula SAM aporta etileno y extensiones amino para la biosíntesis de poliaminas. Por ello consideramos que el metabolismo carbón-uno (C1), junto con ROS y la captura de energía solar están ligados inexorablemente con la productividad. En las siguientes figuras se muestran al par de moléculas que participan de manera importante en el metabolismo C1.



GLOSARIO

Ferroptosis, un proceso de muerte celular programado o fisiológico que mata a la célula al inducir estrés oxidativo, principalmente en forma de peroxidación lipídica. La activación de la ferroptosis está altamente regulada, muy similar a la de la apoptosis.

INNOVACIONES TECNOLÓGICAS AL SERVICIO DE LA MILPA, AL SERVICIO DEL CAMPO 337

otro compartimiento celular que incluye proteínas o moléculas con un potencial REDOX suficientemente alto para excitar o donar un electrón al oxígeno atmosférico. Luego son eliminados o desintoxicados por una serie de enzimas antioxidantes y moléculas antioxidantes. Este proceso de producción de ROS como un subproducto del metabolismo aeróbico, junto con la eliminación de ROS por mecanismos antioxidantes celulares, ocurre constantemente en las células para prevenir algunos de los posibles efectos tóxicos de ROS que podrían incluir DNA, RNA, proteína y oxidación y daño de la membrana (denominados colectivamente estrés oxidativo). Los numerosos sistemas antioxidantes de la célula mantienen por lo tanto ROS en un nivel basal no tóxico, y cualquier desviación de este equilibrio podría usarse para las reacciones de señalización de ROS.

REDOX biología, un término amplio utilizado para describir la regulación de la expresión génica, las vías metabólicas y los mecanismos de transducción de señales mediante reacciones REDOX mediadas por la oxidación y reducción de residuos de cisteína (Cys) de las proteínas que alteran su estructura y función. El estado REDOX general y la regulación de las reacciones REDOX en las células están directamente relacionados con los niveles de ROS, porque las ROS, como el H_2O_2 , pueden oxidar los residuos de Cys a pH fisiológico.

Necrosis regulada, un término usado para describir una variedad de diferentes tipos de procesos de muerte celular fisiológicos o programados que no son apoptosis. Al igual que la apoptosis, estas formas de muerte celular programada están controladas por un programa genético, están altamente reguladas, pueden ser desencadenadas por ROS y son diferentes de la necrosis clásica, que es inducida externamente. La ferroptosis a menudo se conoce como una de las vías de necrosis reguladas de la célula.

Red ROS, la colección de genes y proteínas que controlan la producción, percepción y eliminación de ROS en las células.

DE LA ENERGÍA CUÁNTICA A LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE A TRAVÉS DE BIOMOLÉCULAS- LIXIVIADO ANTIOXIDANTE: “VACUNA”

La información que se proporciona tiene propiedad de autor y no puede ser reproducida sin permiso de este.

Hacer las cosas lo más simples posible, pero no más simple, por ello aplicar el conocimiento a través de tecnología apropiada salvará la productividad de los agroecosistemas.

Viajar al lado de gigantes activos en la productividad primaria proporciona una gran visión y oportunidad para el desarrollo de tecnología apropiada para el manejo sustentable del agroecosistema.

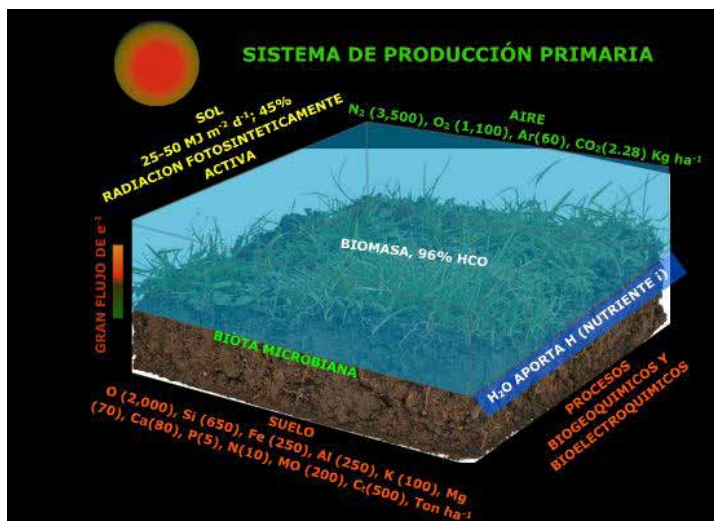
La productividad de los agroecosistemas es un resultado de la ecuación: Productividad primaria = Experiencia del productor + Conocimiento científico) x 2 Actitud.

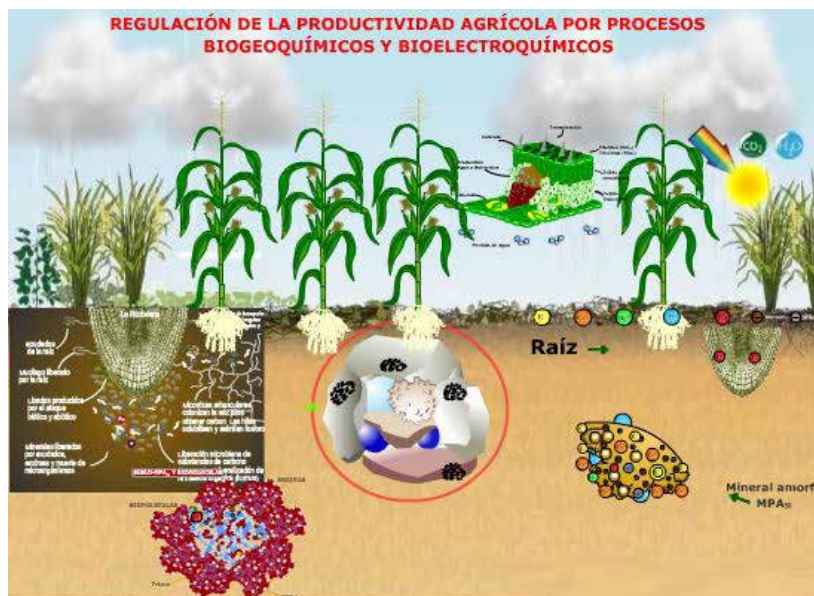
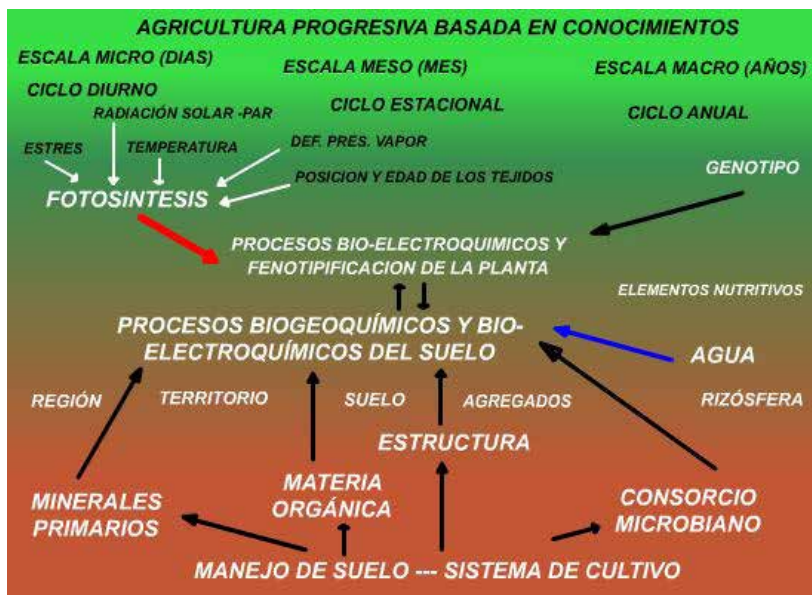
Maíz (*Zea mays*) ~10,000 años a los gigantes de la electroquímica, 1860:
Ludwig Boltzmann y colaboradores en Graz, 1887. (de pie, desde la izquierda) Nernst, Streintz, Arrhenius, Hiecke, (sentado, desde la izquierda) Aulinger, Ettingshausen, Boltzmann, Klemenčič, Hausmanninger.



EL AGROECOSISTEMA Y SUS COMPONENTES

Los componentes aire, radiación solar, suelo, agua y biodiversidad primaria y los procesos de la productividad sustentable del agroecosistema se muestran en la siguiente figura:

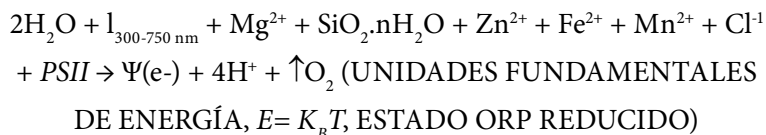




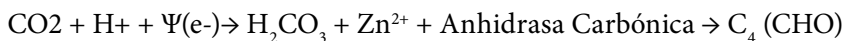
BASES DE LA TEORÍA CUÁNTICA A LA PRODUCTIVIDAD SUSTENTABLE

La nutrición del agroecosistema: espacio temporal

NUTRICIÓN LUMÍNICA



NUTRICIÓN CARBÓNICA



NUTRICIÓN MINERAL

Si, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo

NUTRICIÓN CARBÓN MINERAL Y ORGÁNICO

$\Psi(\text{e}^-)$, MEDIADO POR CARBÓN, CARBOXILOS, HUMUS,
MATERIA ORGÁNICA, (Fe^{2+} , Zn^{2+} , S^{2-} , Mn^{2+})

LA UNIDAD FUNDAMENTAL DE ENERGÍA, $E = K_B T \cong \Delta P \cong \Delta \Psi - 50$

En la teoría cuántica de los sólidos la unidad fundamental de energía está dada por $E(T) = K_B T$, la cual, a nivel del metabolismo celular, es prácticamente igual a la energía (fuerza) térmica, química, electrostática, donde K_B es la constante de Boltzmann $8.6173303 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$, T es la temperatura en $^\circ\text{K}$. El valor de la unidad fundamental de energía, para reacciones bioquímicas en temperatura ambiente, es $K_B T = 0.59 \text{ Kcal mol}^{-1}$, $K_B T = 2.5 \text{ KJ mol}^{-1}$, $K_B T = 25.7 \text{ meV}$, $K_B T = 4.1 \times 10^{-21} \text{ J}$. Este

valor se emplea para calcular la energía producida por la hidrólisis de la molécula de energía ATP, que es de $20K_B T \cong 500 \text{ meV}$ o 50 KJ mol^{-1} .

En el metabolismo cuántico la unidad de energía fundamental es $E(\tau) = g \tau$, donde τ es el tiempo del ciclo metabólico, el tiempo medio de rotación de la reacción de oxidación-reducción, la cantidad $g = (\bar{g}w)/N_A$, donde w denota la masa media de proteínas, y $\bar{g} = (C\Delta p)$, y N_A denota el número de Avogadro. El parámetro C describe la conductancia del protón (nmol H^+ por unidad de tiempo por mg de proteína, mV) y Δp , la fuerza motriz del protón en mV ($\Delta p = \Delta\psi - (2.3RT/F)\Delta\text{pH}$), ambos parámetros bioenergéticos. Donde $\Delta\psi$ es el potencial de membrana en mV entre el interior y el exterior de los tejidos o células, este valor es regulado por componentes de la membrana, lípidos y diversas proteínas del tipo acuaporinas y plasmodesmos, F denota la constante de Faraday. La cantidad $E(\tau)$ es la energía metabólica total generada por ciclo por mol, y es igual a la demanda de energía para desarrollo.

La fuerza motriz del protón H^+ se puede cuantificar por la siguiente ecuación basada en la relación de Nernst, considerando que el potencial químico del hidrógeno es: $\Delta\bar{\mu}_{\text{H}^+} = F\Delta\psi + 2.3RT\log\left(\frac{[\text{H}^+]_i}{[\text{H}^+]_o}\right)$ y que la fuerza motriz es igual a este, por lo que $\Delta p = \frac{\Delta\bar{\mu}_{\text{H}^+}}{F} = \Delta\psi + 2.3\frac{RT}{F}\log\left(\frac{[\text{H}^+]_i}{[\text{H}^+]_o}\right)$ podemos establecer la relación: $\frac{\Delta\bar{\mu}_{\text{H}^+}}{F} = \Delta p = \Delta\psi - 2.3\frac{RT}{F}\Delta\text{pH}$, que finalmente proporciona: $\Delta p = \Delta\psi - 50\text{mV}\Delta\text{pH}$, donde ΔpH es la diferencia de pH entre el interior, $[\text{H}^+]_i$ y el exterior $[\text{H}^+]_o$ del tejido. En la última ecuación se observa que el flujo de protones y electrones está regulado grandemente por el potencial de membrana.

Se puede estimar de manera similar el flujo de nutrientes que demanda el tejido o célula, por ejemplo, para el fósforo del exterior al interior se emplea la siguiente expresión: $\Delta\bar{\mu}_{\text{H}_2\text{PO}_4} = -1\Delta\psi + RT\ln\left(\frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_i}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_o}\right)$, donde el valor de $\Delta\psi$ definirá si el fósforo o los protones H^+ se pueden mover hacia dentro de los tejidos o células o permanecerán fuera. Los valores obtenidos por la ecuación cuando $\Delta p < 0$ ó negativo o decrece con el proceso del flujo, la reacción es espontánea o exergónica, en la dirección que está. Para cuando $\Delta p > 0$ ó es positivo o bien crece durante la

reacción, procede espontáneamente en la dirección contraria de como esta descrita. Cuando $\Delta p = 0$ ó tienen un valor mínimo, la reacción está en equilibrio y no procede espontáneamente en ninguna dirección.

De acuerdo con la hipótesis de escala multinivel, la tasa metabólica de todo el organismo, P, ahora es dada por, $P \sim C\Delta p W^\beta$, donde W es la biomasa. El exponente de escala β depende del tiempo de ciclo τ . Para los sistemas definidos por un ciclo de tiempo grande, tenemos $\beta = 1$, tal como ocurre en las plantas. Como $\bar{g} = (C\Delta p)$ donde $\Delta p \cong \Delta\psi/50$, y que $\Delta\psi$ es el potencial de óxido-reducción cuantificado con el potenciómetro ORP (Oxidation Reduction Potential) en mV, podemos establecer que esta cuantificación muestra la capacidad de un suelo, solución, tejido, célula, organelo, proceso metabólico, de donar energía y electrones. Por ejemplo, si una solución muestra un ORP = -200 mV, el Δp es igual a -250 mV, indica que esta ejerce fuerza química, térmica y electrónica hacia el tejido presente en la solución. Por otro lado, si el valor de ORP es positivo, nos indica que la solución demandará energía y, por la acción de masas, tratará de extraer y no aportar.

De manera general expresamos el flujo de cuántico de energía y minerales en un agroecosistema, por la siguiente ecuación empírica:



En la ecuación, MPA_{Si} representa a más de 3,000 minerales primarios amorfos que se encuentran formando la estructura del suelo, I_{sol} es la radiación solar que llega a la canopia del cultivo, ne^- es el potencial de energía ψ (ORP), M^0 es el elemento empleado en la nutrición, con todos sus electrones y por ello reducido.

Otra ecuación importante es la hidrólisis de ATP ya que es a través de esta molécula que ocurre la mayor cantidad de energía en la célula y una mol de ella produce $20K_B T$, unidades fundamentales de energía:

El proceso de transformación de energía implica la interconversión de tres formas de energía.

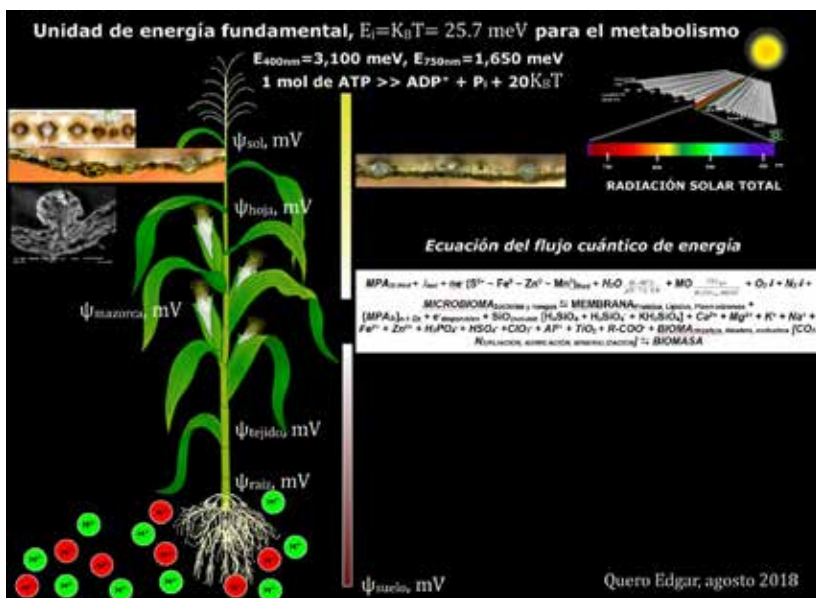
1. La diferencia de potencial REDOX, $\Delta\psi$, es decir, el potencial REDOX real entre el donante y el aceptante se unen en la cadena de transferencia de electrones (e^-).
2. La fuerza motriz del protón representa la energía libre almacenada en los gradientes de protones electroquímicos de la membrana.
3. El potencial de fosforilación $\bar{g}$, para la síntesis de ATP.

El modelo propuesto, con el empleo de biomoléculas-lixiviado, muestra que la dependencia del tamaño de la biomasa involucra tres factores principales:

- a. Eficiencia metabólica: la medida en que el proceso de transferencia de electrones se acopla a la fosforilación de ADP.
- b. Composición de la membrana: la composición de fosfolípidos, proteínas de transporte (tipo acuaporinas) y plasmodesmos en la biomembrana, en la superficie de las hojas el silicio juega un importante papel en el flujo de electrones. Esta propiedad determina los parámetros bioenergéticos tales como la conductancia del protón y la fuerza motriz del protón.
- c. Geometría de red: la complejidad de la red circulatoria (floema, xilema, plasmodesmos) por la cual los nutrientes se transportan dentro de las células y tejidos del organismo.

A manera de ejemplo se muestran las siguientes figura y tabla.

Diagrama esquemático de los perfiles eléctricos y las distribuciones de iones del de la solución del suelo a la superficie de la célula raíz, las hojas y semilla de la planta de maíz. Los cationes se denotan por M^{2+} (en círculo rojo) y los aniones se denotan por M^{2-} (en círculo verde). Ψ denota la carga negativa o positiva en mV, que muestra el potenciómetro de ORP, de los componentes del agroecosistema, integrados por una diversidad de membranas, integradas por lípidos, proteínas del tipo acuaporinas y plasmodesmos. La línea de gradiente de amarillo a blanco indica el flujo del potencial de energía y electrones de la hoja a las semillas, y la línea de gradiente de café a blanco indica el flujo de energía, concentración de nutrientes minerales y electrones del suelo a las hojas y semilla. El flujo de energía es promovido por la adición de solutos con un ψ con valor negativo ente -100 a -300 mV y las diferencias de este a través del gradiente indica la cantidad de energía que se debe aportar, sobre todo entre el suelo y tallo (este funciona como un gran almacén de nutrientes minerales).



En la siguiente tabla se muestran valores del flujo de nutrientes y energía en la planta de maíz, que se obtienen en un cultivo con manejo sustentable y la aplicación regular de biomoléculas lixiviado suplementado con consorcio microbiano.

Análisis elemental realizado a agroecosistema de maíz, con manejo sustentable, a través de técnicas de espectroscopía de rayos X (EDS y XRF) en el laboratorio del Centro Nacional del Innovación y Transferencia Tecnológica de Hidalgo. Quero Edgar, et. al. Agosto 2018.

		Lixiviado Biomoléculas	Microbioma líquido	Extracto de suelo	Extracto de tallo	Lámina de hoja	Nervadura de hoja	Semilla
ELEMENTO		mM l ⁻¹	mM l ⁻¹	mM l ⁻¹	mM l ⁻¹	mM kg ⁻¹	mM kg ⁻¹	mM kg ⁻¹
Carbón	C	1,408.349	3,809.541	0.667	20,215.366	46,075.583	43,128.211	43,478.032
Oxígeno	O	2,101.128	2,758.756	1.114	24,642.331	24,550.921	28,019.801	28,726.077
Potasio	K	247.088	411.111	0.034	1,116.077	1,847.096	1,215.933	327.943
Fósforo	P	21.397	23.880	0.035	112.874	239.383	101.770	275.308
Magnesio	Mg	11.635	8.302	0.016	26.218	96.145	43.493	104.672
Azufre	S	49.131	55.834	0.012	12.565	242.695	28.436	67.697
Silicio	Si	85.174	111.032	0.215	145.965	2,634.021	471.532	34.034
Cloro	Cl	184.697	111.488	0.102	200.322	533.647	217.843	28.170
Aluminio	Al	40.572	16.342	0.033	36.528	34.931	37.440	15.261
Sodio	Na	2.910	1.775	0.043	0.000	18.182	8.069	10.486
Calcio	Ca	5.288	212.114	0.102	80.737	477.581	111.051	7.607
Hierro	Fe	0.803	7.935	0.024	16.199	31.888	35.174	4.195
Zinc	Zn	0.506	0.869	0.007	1.758	8.780	1.223	1.220
Manganeso	Mn	9.004	0.243	0.017	0.000	5.663	5.666	0.874
Cobre	Cu	2.783	0.388	0.001	1.693	1.654	1.136	0.350
Titanio	Ti	3.319	2.436		2.828	2.254	2.672	
pH		6.76	3.94	7.64	5.18			
ORP, ψ	mV	-175.91	-21.00	264.21	153.64			
UEF		-9.04	-2.84	8.57	4.15			
EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	15,555.17	22,737.89	995.63	7,444.40			

TECNOLOGÍA APROPIADA: PRODUCCIÓN DE BIOMOLÉCULAS-LIXIVIADO

Sistema para producir un líquido con alta concentración de biomoléculas-lixiviado-orgánico, con actividad química y biológica para aprovechar de manera eficiente el patrimonio suelo e inducir la resistencia sistémica en cultivos agrícolas. Para lograr este propósito, se requiere que el líquido de biomoléculas contenga en su composición una gran diversidad de sustancias con radical carboxilo [$\sim\text{COOH}$] con diferente peso molecular y ser químicamente reducidas, capaces de donar energía, con un pH alcalino superior a 7.5, una conductividad eléctrica mayor a 12,000 ppm y potencial REDOX de -300 mV, con rH menor que 10.

La adecuada producción y aplicación de biomoléculas permiten tener una herramienta eficiente para la disolución de minerales primarios que aportan nutrientes a la solución del patrimonio suelo y ser aprovechados por los cultivos agrícolas durante el desarrollo del ciclo agrícola. Ello ocurre en la capa arable de 40 cm. Asimismo, las biomoléculas se emplean para activar el desarrollo y multiplicación de la diversidad del bioma microbiano, promover la transformación y el aprovechamiento de los esquilmos agrícolas, mediante materiales estables como el humus, que actúa como base para formar quelatos con cationes requeridos en la nutrición de la planta: nitrógeno (N), calcio (Ca), potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg), boro (B), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), etc. También, las biomoléculas se emplean como base para la reproducción del consorcio microbiano y al mismo tiempo para realizar la transformación de biomoléculas en productos con alta actividad biológica y hacer mejoras en el crecimiento de los cultivos agrícolas. Otra aplicación de las biomoléculas es contribuir con la nutrición de los cultivos vía foliar.

Se recomienda distribuir la aplicación de biomoléculas de la siguiente manera: 60 litros antes de la siembra, 50 litros a la siembra y 190 litros distribuidos cada 20 días a través de riego. Se recomienda realizar análisis de las biomoléculas-lixiviado por la técnica EDS-XRF, ello con la finalidad de conocer los aportes minerales para la nutrición. Se

recomienda que con regularidad se cuantifique el pH, el potencial de óxido-reducción (ORP) y la conductividad eléctrica.

INSUMOS

- a. Estiércol seco vacuno de tres a seis meses de edad (1 m³, aproximadamente 800 kg).
- b. Tela porosa tergalina de 2.77 metros de ancho (10 metros).
- c. Contenedor de plástico de 1000 litros con jaula metálica y pallet plástico, (dos unidades).
- d. Bomba sumergible (una bomba 1 HP).
- e. Activador mineral de ciclos biogeoquímicos, BioGeo® (100 kg).
- f. Ácido acetilsalicílico y/o ácido salicílico (100 g).
- g. Cedazo de plástico para remover y cribar los sólidos.
- h. Conexiones, válvulas y aspersores de plástico polietileno y/o de PVC.



PROCEDIMIENTO TÍPICO

Primero, colocar el recipiente de 1,000 litros que está abierto en la parte superior, sobre el recipiente cerrado. El recipiente abierto servirá para llenarlo con estiércol, mineral BioGeo® y agua, para que se produzcan biomoléculas a través de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos. El recipiente cerrado servirá para almacenar las biomoléculas que se producen.



El estiércol-materia orgánica reacciona con el mineral BioGeo®, en presencia de agua y aire (O_2), creando el proceso BBB (Biomoléculas, Biogeoquímica, Bioelectroquímica), como se muestra en la reacción anterior.

El estiércol se coloca en capas de 15 cm, sobre las cuales se espolvorea una pequeña capa de activador mineral BioGeo®, después se agrega agua sólo para humedecer. Luego se coloca otra capa de estiércol y activador mineral. (Se recomienda intercalar capas de tela tergalina, para fácil remoción de la materia orgánica residual que se obtiene al final de proceso.) Así se continúan adicionando capas hasta llenar el tanque de 1,000 litros. Una vez lleno, se aplica agua hasta saturar el estiércol, dejar reposar por 5 horas. Después, las biomoléculas se pasan al recipiente inferior y vaciar el recipiente, luego el líquido oscuro con las biomoléculas otra vez se pasa al recipiente con estiércol. La recirculación de biomoléculas se realiza por 30 días, tiempo en el cual ocurre el proceso biogeoquímico y bioelectroquímico que se requiere para que las bio-

moléculas activen el mejor aprovechamiento del patrimonio suelo, y lograr mejorar la cosecha y sanidad del cultivo.

Después de obtener los primeros 1,000 litros de biomoléculas, nuevamente se adicionan aproximadamente 1,000 litros de agua, para obtener otros 1,000 litros de biomoléculas. Este proceso se recomienda realizarlo 3 veces por cada 800 kilos de estiércol y 100 kilos de mineral BioGeo®, es decir que, por cada metro cúbico de estiércol, se pueden obtener 3,000 litros de biomoléculas.

Se recomienda aplicar al patrimonio suelo 300 litros de biomoléculas por hectárea en un ciclo agrícola de 6 meses. Las biomoléculas se pueden aplicar al campo concentradas o en dilución con agua; asimismo, se pueden almacenar en lugar fresco por más de 6 meses.

Programa ideal para activar el aprovechamiento del patrimonio suelo:

- 300 litros 2 meses antes de siembra.
- 100 litros a la siembra.
- 100 litros al primer riego.
- 100 litros al segundo riego.



$$\Delta p \cong \Delta \psi - 50$$

BENEFICIOS DE LAS BIOMOLÉCULAS APLICADAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL PATRIMONIO SUELO

1. Las biomoléculas-lixiviado se producen y transforman por un proceso bio-geoquímico y bioelectroquímico, con la ocurrencia de minina fermentación.
2. Las biomoléculas actúan disolviendo los nutrientes presentes en el patrimonio suelo; esto significa que se aprovechan 1,000 kilos de minerales de las 4,000 ton ha⁻¹, presentes en la capa arable del suelo, a 40 cm de profundidad. Los elementos que se solubilizan en el suelo son silicio, fósforo, hierro, zinc, calcio, magnesio, potasio, nitrógeno, y demás microelementos presentes en él.
3. Se incrementa el contenido de materia orgánica rica en carboxilos, carbohidratos, fenoles y flavonoides, los cuales son precursores de nutrientes orgánicos y fuente de energía para el desarrollo de la rizosfera.
4. La solución de biomoléculas es rica en sustancias que nutren el desarrollo de la planta, como aminoácidos, azúcares, precursores de hormonas y otras moléculas con actividad biológica que activan procesos metabólicos y suprimen el desarrollo de plagas y enfermedades.
5. Las biomoléculas contienen nutrientes minerales, en una concentración de 20 a 30 gramos por litro.
6. Se induce el desarrollo de la biota microbiana benéfica nativa del suelo y la colonización de la rizosfera por biota microbiana inducida.
7. Las moléculas orgánicas son precursoras para la formación de metabolitos secundarios que la planta emplea para su adaptación biótica y abiótica, así también promueven la formación de moléculas con actividad biológica para la supresión del desarrollo de plagas de insectos y enfermedades, de tal forma que en la rizosfera se crea una bio-fábrica, proveedora de nutrientes y metabolitos secundarios.
8. Hacen que el suelo sea un medio adecuado para el desarrollo de las plantas, al crear condiciones bioelectroquímicas que proporcionan mayor disponibilidad de energía.
9. Suprimen la contaminación al transformar y dar valor agregado a los desechos orgánicos (estiércol) de ganado vacuno.
10. Se promueve la descompactación del suelo y la formación de agregados.

11. Se incrementa la captura de agua de lluvia y riego, de tal manera que el suelo puede almacenar y hacer disponible este importante líquido por un periodo más largo de tiempo.
12. Es una manera efectiva de activar los procesos biogeoquímicos del suelo, relacionados con la productividad de las cosechas.
13. Proporciona una forma de dosificar oxígeno disuelto, y promover un mejor desarrollo de la rizosfera.
14. Induce la captura, almacenamiento y mineralización del carbón en el suelo.
15. No es contaminante.
16. Su proceso de producción es relativamente simple.

A manera de resumen se presenta muestra los resultados de la aplicación de biomoléculas sobre el patrimonio suelo.

Impacto sobre la actividad del suelo, de las biomoléculas-
lixiviado-antioxidante-vacuna.

Parámetro del suelo	Acción o efecto
Estabilidad de agregados del suelo	Incremento
Densidad aparente	Disolución de partículas grandes, mayores de 2 mm
Capacidad de almacenamiento de agua	Incremento
Factores químicos	
Metales pesados (Cd, Cr, Ni, Pb, etc.)	Supresión
Micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn, etc.)	Incremento
Macronutrientes (N, P, Si, Mg, K, Ca, S)	Incremento
pH	Estable 7.0 a 7.5
Conductividad eléctrica	Incremento
Potencial óxido-reducción	El suelo oxidado, sin energía, pasa a reducido con energía
Carbón orgánico	Incremento
Ácidos húmicos	Incremento
Biológico	
Bioma microbiano de la rizosfera	Incremento

Actividades enzimáticas	
i. Deshidrogenasa	Incremento
ii. Fosfatasa	Incremento
iii. Glucosidasa	Incremento
iv. Actividad ureasa	Incremento
Población microbiana (bacterias aeróbicas y población de hongos)	Incremento
Actividad de la biota microbiana	
i. Respiración el suelo y liberación de CO ₂	Incremento
ii. Disolución de minerales del suelo y degradación de materia orgánica	Incremento

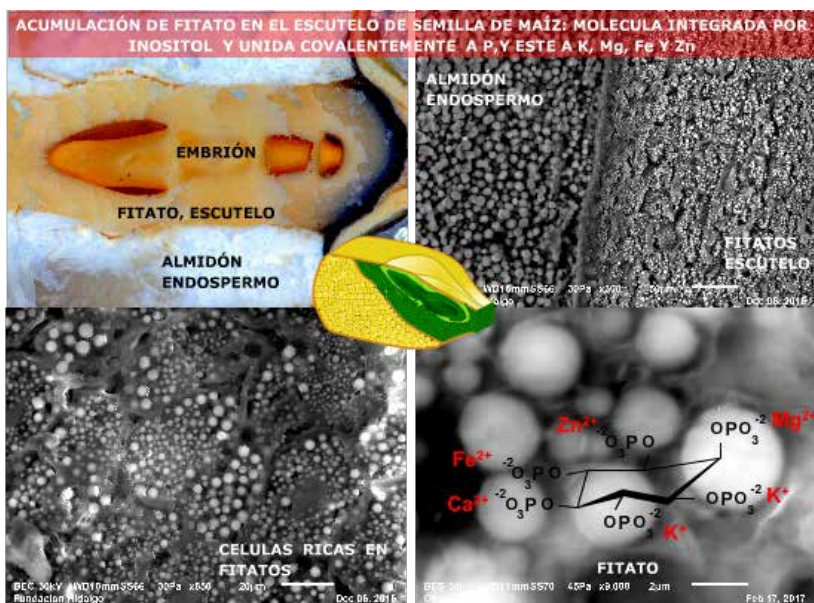
LA NUTRICIÓN DEL MAÍZ Y REQUERIMIENTOS DE FÓSFORO

La concentración de fósforo es seguramente la forma de almacenar unidades fundamentales de energía ($E = K_B T \cong \Delta p \cong \Delta \psi - 50$) en la semilla de maíz, siendo fundamental para cumplir con la dieta diaria de los consumidores, por ello lograr este objetivo en los altos rendimientos de grano es primordial. Este mineral junto con K, Mg, S, Si, Fe, Ca, Zn y Cl, forman las reservas de la semilla que almacenan en el tejido escutelo, en estructuras de fitatos, que son pequeñas estructuras esféricas sólidas de 1 a 4 μ , integradas por un complejo de la molécula de inositol, en el cual sus 6 hidroxilos están unidos covalentemente a fósforo, al que se unen los cationes. A través de la cuantificación químico elemental, mediante la espectroscopía de rayos X (EDS y XRF), de semillas tratadas con biomoléculas se encuentra la relación lineal del fósforo con el K, Mg, S, Si, Fe, Ca, la cual podemos expresar matemáticamente por la siguiente ecuación, donde la concentración de cada uno se expresa en mili moles (mM):

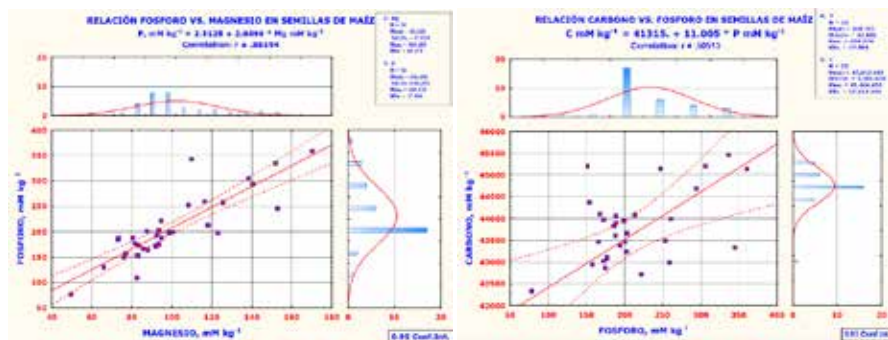
$$[P] \text{ mM} = 0.3583 [K] + 1.4014 [Mg] + 0.5055 [S] + 0.8178 [Si] - 2.5945 [Fe] + 1.8756 [Ca] - 58.9378, R^2 = 0.9148.$$

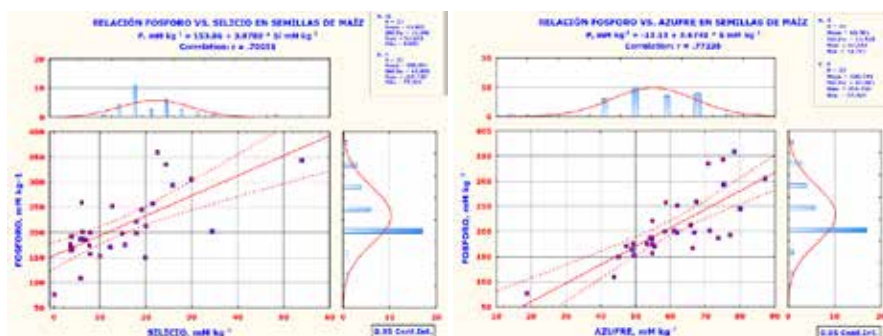
Este comportamiento se ilustra con la siguiente imagen obtenida con microscopía electrónica de barrido (MEBA) y las gráficas del análisis estadístico:

MEBA



Análisis estadístico





CONFERENCIAS

Quero Edgar: Cultivo orgánico del maíz

- (1) <https://www.youtube.com/watch?v=4UhAtFl4gXg> (14,526 visualizaciones)
- (2) https://www.youtube.com/watch?v=_A6Vf5W6JhI (12,366 visualizaciones)

VisMoTV, Ajacuba, Hidalgo, abril 2013,

Quero Edgar: Biogeoquímica del silicio

- (1) <https://www.youtube.com/watch?v=8CI405BJX8g> (8,666 visualizaciones)
- (2) <https://www.youtube.com/watch?v=Qxsl330V05w> (5,754 visualizaciones)

Segundo simposio internacional Por México Hablemos del Maíz:
Guadalajara, Jalisco, marzo 2013

Quero Edgar: La rizosfera del maíz

https://www.youtube.com/watch?v=SCtaltnY_-c (14,286 visualizaciones)

Tercer simposio internacional Por México Hablemos del Maíz: Guadalajara,
Jalisco, marzo 2014

PUBLICACIONES

Quero Edgar, (Mayo, 2018): “Manejo del cultivo de maíz con tecnología apropiada basada en conocimientos”, Quero Consulting S.C., Atardecer No. 107 Col. Puesta del Sol, Celaya, Guanajuato, CP. 38016,

- México, queroed@hotmail.com, Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica de Hidalgo, Fundación Hidalgo Produce A.C., Blvd Las Torres s/n, Col. San Miguel La Higa, Mineral de la Reforma, Hgo., México, CP. 42186. cenitth@gmail.com, 17 pp, https://www.researchgate.net/publication/325428462_MANEJO_DEL_CULTIVO_DE_MAIZ_CON_TECNOLOGIA_APROPIADA_BASADA_EN_CONOCIMIENTOS (1,067 lecturas).
- Quero Edgar (Mayo, 2018): “Manejo sustentable del patrimonio suelo en el cultivo de maíz”, Quero Consulting S.C., Atardecer No. 107, Col. Puesta del Sol, Celaya, Guanajuato, CP. 38016, México. quero@lo-quequero.com, Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica de Hidalgo, Fundación Hidalgo Produce A.C., Blvd Las Torres s/n, Col. San Miguel La Higa, Mineral de la Reforma, Hgo., CP. 42186. cenitth@gmail.com, https://www.researchgate.net/publication/325428422_Manejo_sustentable_del_Patrimonio_Suelo_maiz 36 pp (493 lecturas).
- Quero Edgar, Miroslava Lugo Lozano, Esteban Sánchez Rodríguez (2018): “Caracterización elemental de semilla de maíz (*Zea mays*) nativo (mexicano)”, Quero Consulting S.C., Atardecer No. 107 Col Puesta del Sol Celaya Guanajuato CP. 38016, México. queroed@hotmail.com, Centro Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica de Hidalgo, Fundación Hidalgo Produce A.C., Blvd Las Torres s/n, Col. San Miguel La Higa, Mineral de la Reforma, Hgo., CP. 42186. cenitth@gmail.com, El Colegio Michoacán A.C. Cerro de Nahuatzen 85, Jardines del Cerro Grande, Cerro Grande, 59370 La Piedad de Cavadas, Mich., ladipa@colmich.edu.mx, 11 pp. (mayo 2018) https://www.researchgate.net/publication/325479262_CHARACTERIZACION_ELEMENTAL_DE_SEMILLA_DE_MAIZ_ZEA_MAYS_SPP_NATIVO_MEXICANO (398 lecturas).
- Quero Edgar (Jullio, 2017): “Producción de ProRedox; biomoléculas-lixiado, orgánico antioxidante-vacuna”. Conferencia, Agricultura del Futuro. Fundación Hidalgo Produce S.C., 18 pp. https://www.researchgate.net/publication/318897167_PRODUCCION_DE_PROREDOX_BIOMOLECULAS_-_LIXIVIADO_ORGANICO_ANTIOXIDANTE_-_VACUNA (1,231 lecturas).

- Quero Edgar (Marzo, 2017): “Manejo Soil4+ en el cultivo del maíz”, Quero Consulting S.C., Atardecer 107, Col. Puesta del Sol, Celaya, Guanajuato, CP 38016, <https://www.facebook.com/soilformore/>, queroed@hotmail.com, quero@loquequero.com, Fundación Hidalgo Produce A.C. Blvd Las Torres s/n, Col. San Miguel La Higa, Mineral de la Reforma, Hgo., CP. 42186. cenitth@gmail.com, <http://hidalgoproduce.org.mx/>, https://www.researchgate.net/publication/315044292_MANEJO_Soil4_EN_EL_CULTIVO_DEL_MAIZ (228, 19 pp (1,014 lecturas).
- Quero Edgar (Enero, 2016): “Protocolo del manejo del maíz”, publicado en https://www.researchgate.net/publication/299328518_Protocolo_manejo_del_maiz, como parte de investigación e innovación del manejo sustentable del maíz, en los estados de Michoacán, Jalisco, Hidalgo y Sinaloa, 8 pp (1,362 lecturas).
- Quero Edgar (2015): Manejo sustentable del suelo, para una productividad progresiva, Foro Nacional de Análisis y Discusión de Propuestas de Alta Productividad y Sostenibilidad en la Producción de Granos, Centro de desarrollo tecnológico, FIRA, Gto.
- Juan Martín Parra Delgado, Edgar Quero Gutiérrez, Leopoldo Partida Ruvalcaba, Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz, Tomás Díaz Valdés, Felipe Ayala Tafoya, Marino Valenzuela López (Septiembre, 2015) *Yield of Tomato in Soil Treated with Compost, Amorphous Primary Minerals and Microorganisms*. Open Access Library Journal, September 2015, Vol. 2, (244 lecturas)
- Quero Edgar (2012): “Manejo 4M-MAS en el cultivo de maíz”, Curso de agricultura orgánica y sustentable, Fundación Produce Sinaloa, febrero, 139-155 pp.
- Quero Edgar (Julio, 2011): “Índice de sustentabilidad del suelo y la nutrición biodinámica”, Tercer Diplomatura Internacional en Agricultura Orgánica, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México, 5-9 julio, 2011, 12 pp.
- Quero Edgar, Sánchez Rodríguez Esteban, Sánchez Rodríguez Martín (Agosto-Septiembre 2010): “Índice de sustentabilidad del suelo y patrimonio de la cadena alimentaria del maíz”. *deRiego: Protección y Nutrición de Hortalizas y Frutas* Año 8 No. 51: 76-81 Agosto-Septiembre, 2010.

Quero Edgar (Octubre, 2009): “Nutrición con silicio y sus aplicaciones a campo abierto y en agricultura protegida”, Primer Simposio Internacional de Nutrición Vegetal, 7-9 octubre, Guadalajara, Jalisco, México. 40 pp. https://www.researchgate.net/publication/266375207_NUTRICION_CON_SILICIO_Y_SUS_APLICACIONES_A_CULTIVOS_A_CIELO_ABIERTO_Y_EN_AGRICULTURA_PROTEGIDA_Un_pequeno_recorrido_por_la_naturaleza (3,965 lecturas).

LA TECNOLOGÍA APROPIADA DE LAS BIOMOLÉCULAS ES
SIMPLE, REPRODUCIBLE, MEJORABLE, ESCALABLE:

El activador mineral para la producción de biomoléculas con alta energía fundamental cuántica: ψ (ORP), y potenciómetro para medir el ORP, pH y CE.



SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOMOLÉCULAS







IV

MANEJO SUSTENTABLE DEL PATRIMONIO SUELO EN EL CULTIVO DE MAÍZ

OXIDACIÓN MICROBIANA DE ESQUILMOS Y A LA RESTAURACIÓN PRODUCTIVA
 $4\text{COH}_{(\text{esquimo})} + 3\text{O}_{2(\text{g})} \rightarrow [\text{Biomol}]_n \rightarrow 4\text{CO}_{2(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} + 18 \text{ MJ kg}^{-1}$
1 ton de esquimo consume 827 kg de O₂
producen 1.5 (0.7) ton CO₂, 310 lts de agua, 18 GJ de energía, 55 kg
bioma microbiano, 55 kg carboxilos, 200 kg humicos, 1kg ATP

1 ton esquimo = 18 GJ equivalen a 400 litros de gasolina



QUERO EDGAR
INFORMES: 4611582332

CELAYA, GUANAJUATO,

El desarrollo de la producción agrícola sustentable y progresiva se puede expresar por la relación:

Producción Calidad, Cantidad y Eficiencia =

$$(\Sigma A_{\text{Experiencia}} + \Sigma B_{\text{Conocimiento}}) * e^c_{\text{Actitud}}$$

La búsqueda de la productividad generalmente se ha realizado por los productores agrícolas mediante la transmisión oral de saberes, obtenidos con la generación de conocimiento empírico por la realización de ensayos de prueba y error, ganando una gran experiencia. La demanda de mayor producción y la realización de procesos agrícolas con uso

eficiente de recursos renovables y económicos requiere de una mayor incorporación de conocimientos generados por la ciencia. Esta acción de vinculación experiencia-conocimiento es activa, pasando de intenciones a realización de proyectos, en los cuales se crean puentes sólidos de vinculación, logrando la socialización y democratización del conocimiento, y pasar a la innovación, transferencia y desarrollo tecnológico, practicando un trabajo participativo con un enfoque en el extensionismo transdisciplinario, para impulsar la actitud y empatía entre la experiencia y el conocimiento y generar tecnología apropiada.

La tecnología apropiada presenta la mayor demanda de conocimientos para la realización certera de procesos de manejo del patrimonio suelo (PS), ya que aquí se encuentran las mayores oportunidades de desarrollo de la agricultura, soportadas en un suelo sano (SS), como se ilustra en la siguiente figura:



La generación y transferencia de conocimientos ha ocurrido a lo largo del desarrollo de la humanidad y, como ejemplo, citamos de manera

cronográfica la actividad de culturas, filósofos e investigadores cuya contribución ha impulsado el desarrollo de la agricultura sustentable:

1. En un proceso de domesticación realizado por diferentes culturas de Centroamérica, aproximadamente 10,000 años antes de nuestra era, se logra establecer la planta de maíz (*Zea mays*) a partir de teosinte (*Zea mays ssp. Parviglumis*). Esto se logró gracias a la ortogénesis de la planta y las acciones de manejo, realizadas en la “milpa”. Se puede considerar que este es el primer manejo del suelo, realizado por la práctica de cultivo de tres plantas con sistema radicular diferente, el maíz, frijol y calabaza. Este manejo pasó por generaciones en diferentes culturas, Olmeca (3000 AC), Maya y Teotihuacana (400 AC-50 DC) y la continuaron los Aztecas (1000 DC). Existe una posible representación de la planta de maíz, que deja mucho a la imaginación, con las pirámides de Teotihuacan, en la cual las pirámides de la Luna, del Sol y de la serpiente emplumada representan a la espiga, la mazorca, la raíz y el tallo, respectivamente. Así también, aparentemente ellos conocían que la planta puede producir más de 5 mazorcas, como lo muestran en la pintura *Mural rojo*, que está en Cacaxtla. Ambos sitios se encuentran próximos en el centro del continente americano.
2. Interpretación gráfica de la evolución del maíz, cultura e investigación permanente.
3. El trabajo más honesto: la agricultura. Aristóteles (384-322 AC).
4. Marcus Terentius Varr, 116 AC-27 AC, fue un antiguo erudito y escritor romano. Su único trabajo completo, *Rerum rusticarum libri tres* (*Tres libros sobre agricultura*), ha sido descrito como “el sistema bien digerido de un agricultor experimentado y exitoso que ha visto y practicado todo lo que registra”. Marcus Terentius y otros escritores romanos mencionaron al humus como parte importante de la productividad del suelo (Cicero, Virgil, Pliny the Elder and Columella). Martin, A.E., 1829. *Traite’ the’orique et pratique des amendements et desengrais* (*Tratado teórico y práctico sobre enriquecimientos y fertilizantes*). Rousselon Libr. Ed, París.
5. Sistema de cultivo “chinampa”, en el cual sedimentos de suelo (sumergidos a 1-4 metros de profundidad) son extraídos y colocados en capas sobre una superficie flotante, compuesta por troncos de madera, cañas y piedras, estableciendo en estas el cultivo de diferentes plantas y maíz. Cultura Mexica, Azteca, 1300-1400 DC.

6. Se amplía el conocimiento sobre aplicación y uso del humus en la producción agrícola. Rozier, I.A., 1781-1805. *Cours complet d'agriculture the'orique, pratique, e'conomique et de me'decine rurale et ve'te'rinaire* (Curso integral de agricultura teórica, práctica y económica y de medicina rural y veterinaria), París.
7. Se explica la nutrición de las plantas a través del humus y se plantean bases para la química agrícola y la ley del mínimo. Carl Sprengel, 1828 (1787-1859).
8. Desarrolla la química agrícola (fertilización química con 16 elementos) y se establece la ley del mínimo. Justus von Liebig, 1847 (1803-1873).
9. Descubriendo la variación del número y la actividad de la microflora del suelo, se emitió la idea de que el suelo es un organismo vivo. Sergei Nikolaevitch Winogradsky, *Microbiología como una ciencia de la biología*, 1890,
10. Se propone la fertilización mineral con harina de roca. *Bread from Stones; a New and Rational System of Land Fertilization and Physical Regeneration* (Pan de piedras; un nuevo y racional sistema de fertilización de la tierra y regeneración física). Dr. Julius Hensel (agricultural chemist). 111 pp. 1894.
11. Escribió: cuanto más alto es el contenido de humus, más fértil es el suelo y esta fertilidad parece deberse, especialmente, a una gran cantidad de organismos fijadores de dinitrógeno que viven aquí. Vaillant V. (1901), *Petite chimie de l'agriculteur* (La química del pequeño granjero). Edit. F. Alcan, París, pp 26-27.
12. Señaló que algunas pruebas para diferenciar entre los suelos utilizaron la tasa de descomposición de compuestos orgánicos de nitrógeno en el suelo, haciendo evidente la concepción de que la fertilidad del suelo puede ser estimada por criterios biológicos. Remy, Th. *Ueber die Steigerung des StickstoffIsammlungs-Vermogens der H ulsenfruchte durch bakterielle Hilfsmittel* (Sobre el aumento de la capacidad de toma de nitrógeno de las legumbres mediante ayudas bacterianas). Deut. landw. Presse, 29: 31-32, 37-38, 46-47. 1902.
13. Fue el primer investigador quien sugirió que el poder de un suelo para la desintegración de la celulosa puede servir como índice de fertilidad del suelo. Chistensen H. R. *Fixation of the Atmosferic Nitrogen by Microorganism* (Fijación del nitrógeno atmosférico por microorganismos). Tidsskr. Landbr. Plant-teavl. 16; 303-336 (1909).
14. *Composición total, elemental, de la planta de maíz*. W. L. Latshaw, 1924, Journal of Agricultural Research vol. XXVII, No. II, 845-861, marzo 15, 1924.

15. Se crean las bases de la agricultura biodinámica, primer curso sobre nutrición vegetal. Rudolf Steiner, junio 7-16, 1924 (1861-1925).
16. Elaboró la teoría y la práctica de la agricultura biodinámica, en el Instituto Götheanum-Dornach (Suiza) y fundamentó la concepción de que el suelo se comporta como un organismo vivo, ecológicamente integrado. Steiner R (1924) *Geisteswissenschaftliche Grundlagen zum Gedeihen der Landwirtschaft. Landwirtschaftlicher Kursus Rudolf Steiner* (Fundamentos de las humanidades para la prosperidad de la agricultura. Curso de agricultura Rudolf Steiner), Verlag, Dornach, Switzerland. Bibliographie-Nr. 327, ISBN 3-7274-3270-5 7 and Pfeiffer E (1938), *La fécondité de la terre* (La fecundidad de la tierra). Ed. Triade, París, new edition, in 1966.
17. Se describe la mejor correlación de los procesos vitales y químicos en el suelo. No logró distinguir entre el concepto de fertilidad del suelo y el de productividad del suelo. Waksman S (1932), *Principles of Soil Microbiology* (*Principios de la microbiología del suelo*). London, Edit. Baillière, Tindall et Con., Baillière
18. La primera definición de la fertilidad del suelo la dio el fundador, en Inglaterra, de la agricultura orgánica: la fertilidad del suelo es la condición de un suelo rico en humus, en el que los procesos de crecimiento se desarrollan de manera rápida y eficiente, sin interrupción [...] debe haber un equilibrio permanente entre los procesos de crecimiento y los de descomposición. La clave del suelo fértil y una agricultura próspera es el humus. Howard A. (1941) *Testament agricole –pour une agriculture naturelle* (*Testamento agrícola –por una agricultura natural*), 1st edn. Oxford University Press, London
19. Afirmó que, si hasta ahora la característica de un organismo vivo no se reconocía en el suelo, nadie cuestiona que el suelo cultivable sea un medio biológico organizado. Pavlovski G, Groza M (1949), *Studiul sistemelor fermentative din solul arabil* (*Sistemas Studiul fermentativos en suelo cultivable*). Analele ICAR XIX 1947:3–17.
20. Se incrementa el interés por establecer las funciones depósitos de silicio biogénico del silicio en las plantas con diferentes estudios en plantas acumuladoras de silicio, *Equisetum*, arroz, bambú, árboles tropicales. 1960-1970.
21. Comparó las actividades biológicas de diversos suelos y sugirió que la respiración, las actividades proteolíticas y celulolíticas son los parámetros más adecuados que se correlacionan con la fertilidad del suelo. Maliszewska W (1969), *Comparison of the Biological Activity of Different Soil Types*

(Comparación de la actividad biológica de diferentes tipos de suelos).
Agrokém Tlajt 18:76-81.

22. Investigó la respiración del suelo y su actividad enzimática bajo la influencia de diferentes tratamientos con abonos N, P, K y/o abatimiento de líquidos del ganado y concluyó que el notable aumento de la respiración y las actividades enzimáticas del suelo sólo se producían en tratamientos fecundados orgánicamente, que mostraron un aumento de la fertilidad biológica del suelo. Batistic L, Mayaudon J (1977), *Influence of Mineral Fertilizer and Liquid Organic Fertilizer (Cattle Slurry) on Soil Biological Fertility (Influencia de los fertilizantes minerales y fertilizantes orgánicos líquidos –estiércol líquido de ganado– en la fertilidad biológica del suelo)*. Revue d'Ecologie et de Biologie du sol 14(4): 499–507.
23. La fertilidad es la característica fundamental del suelo, que resulta de la actividad vital de la micropoblación, de las raíces de las plantas, de las enzimas acumuladas y los procesos químicos, generadores de biomasa, humus, sales minerales y sustancias biológicas activas. El nivel de fertilidad está relacionado con el nivel potencial de bioacumulación y procesos de mineralización. Estos dependen del programa y las condiciones de la evolución del subsistema ecológico y de las influencias antrópicas. Ștefanic G (1994), *Biological Definition, Quantifying Method and Agricultural Interpretation of Soil Fertility (Definición biológica, método cuantitativo e interpretación de la fertilidad del suelo)*. Rom Agric Res 2:107-116.
24. La fertilidad del suelo es la característica de la corteza suelta terrestre para alojar procesos complejos (biológicos, enzimáticos, químicos y físicos) que almacenan biomasa, humus y minerales. Ștefanic G, Gheorghită N (2006), *Soil Fertility or Soil Quality (Fertilidad del suelo o calidad de suelo)*. Rom Agric Res 23:57-64.

Este resumen del proceso evolutivo sobre el manejo de los agroecosistemas nos sirve de introducción para describir el proceso de mejora de la producción de la planta de maíz, que en 1860 era de 2 ton ha⁻¹, en contraste con la actualidad, de 12.5 ton ha⁻¹, un incremento de más de 5 veces.

El primer diagnóstico sobre la composición química elemental de la planta de maíz se realizó en plantas cultivadas en el ciclo PV de 1920 y el proceso aparentemente duró tres años y se presentó el reporte en 1924. El análisis que resultó se muestra en la siguiente tabla, donde se ve que CHO es el 95% del peso seco total, mientras que el silicio, nitrógeno y potasio son los nutrientes de mayor concentración en la hoja y en el grano son el nitrógeno, potasio, fósforo y magnesio. Este comportamiento, como describiremos más adelante, se mantiene en los cultivos actuales.

Primer reporte sobre la composición elemental de plantas de maíz, sembradas en mayo y cosechadas en septiembre de 1920. *Elemental Composition of the Corn Plant*. By W. L. Latshaw, Analytical Chemist, Department of Chemistry, and E. C. Miu, ER, Plant Physiologist, Department of Botany, Kansas Agricultural Experiment Station. Vol. XXVII, No. II, Mar. 15, 1924, Key No. Kans.-42. 845-861 pp. Datos modificados por E. Quero, 2010.

Tejido		Hoja	Tallo	Grano	Raíz	Elote	Total
Elemento		g pl ⁻¹	g pl ⁻¹	g pl ⁻¹	g pl ⁻¹	g pl ⁻¹	g pl ⁻¹
Hidrógeno	H	13.748	11.835	18.166	3.461	4.974	52.183
Carbono	C	96.819	89.287	116.719	25.598	35.777	364.200
Oxígeno	O	102.896	88.063	118.233	26.366	35.886	371.444
Nitrógeno	N	3.050	1.685	5.612	0.768	1.079	12.194
Silicio	Si	6.076	0.843	0.042	2.686	1.040	10.687
Potasio	K	3.472	2.467	1.096	0.290	0.360	7.686
Magnesio	Mg	0.493	0.321	0.522	0.103	0.086	1.524
Fósforo	P	0.486	0.179	0.887	0.073	0.074	1.698
Calcio	Ca	1.103	0.341	0.065	0.369	0.017	1.895
Azufre	S	0.563	0.321	0.365	0.151	0.016	1.417
Cloro	Cl	0.521	0.449	0.086	0.067	0.094	1.217
Aluminio	Al	0.174	0.026	0.060	0.593	0.041	0.893
Hierro	Fe	0.164	0.106	0.112	0.315	0.020	0.717
Manganeso	Mn	0.101	0.034	0.097	0.040	0.024	0.296
TOTAL		229.664	195.958	262.062	60.879	79.486	828.050

Por otro lado, presentamos aquí un análisis realizado a plantas de maíz que se cultivaron siguiendo el protocolo sustentable con manejo del patrimonio suelo y empleando a este como principal proveedor de insumos, nutrientes minerales e inductores de resistencia mediada por moléculas provistas por la rizosfera. Tal protocolo, con el objetivo de promover la adaptación ante eventos de agobio, bióticos y abióticos, e impulsar la mejor productividad con una máxima captura de energía solar, y así lograr mayor volumen y calidad funcional (nutrición mineral y promotores de la salud, antioxidantes, vitaminas, etc.) de la cosecha y promover el desarrollo humano sustentable.

En la evaluación realizada se cuantificó la composición química elemental de un cultivo de maíz, cultivado en el ciclo PV 2015 y 2016, las plantas cosechadas tenían el buen desarrollo típico y los tejidos se seleccionaron y procesaron bajo estándares para eliminar contaminación y tener un rango de error del 2%. La concentración total de minerales nos muestra que de los componentes con energía (CHO), se obtuvieron en total 42.59 ton ha⁻¹ (2.945 ton hidrógeno, que proviene del agua de riego o lluvia; 21.372 ton de carbono y 18.277 ton de oxígeno, ambos provenientes del CO₂ atmosférico), que representan una captura de CO₂ de 39.63 ton ha⁻¹, de las cuales el 60%, se integran al patrimonio suelo, al incorporar los esquilmos agrícolas a este patrimonio para mejorar sus funciones. Los resultados de asimilación química total se muestran en la siguiente tabla y figura:

Composición química de un cultivo de maíz con buen desarrollo en agroecosistema de la región del Valle del Mezquital, Hidalgo.

		Grano	Total	Esquilmo	%'
Biomasa, Kg Ha ⁻¹		16,200.00	40,905.00	24,705.00	39.60
Hidrógeno	H	1,186.65	2,945.13	1,758.48	40.29
Carbono	C	8,458.02	21,372.07	12,914.05	39.58
Oxígeno	O	7,567.02	18,277.40	10,710.38	41.40
Silicio	Si	1.66	799.63	797.97	0.21

Potasio	K	122.96	759.22	636.25	16.20
Cloro	Cl	18.50	304.50	286.00	6.08
Calcio	Ca	2.98	246.36	243.39	1.21
Magnesio	Mg	34.49	110.36	75.87	31.25
Fósforo	P	82.99	108.00	25.01	76.85
Azufre	S	25.39	58.07	32.68	43.72
Hierro	Fe	2.55	34.88	32.33	7.32
Sodio	Na	0.00	18.54	18.54	0.00
Zinc	Zn	1.08	6.30	5.23	17.06
Manganeso	Mn	0.00	3.96	3.96	0.00
Cobre	Cu	0.26	1.01	0.74	26.06
Otros		0.63	50.64	50.01	1.25

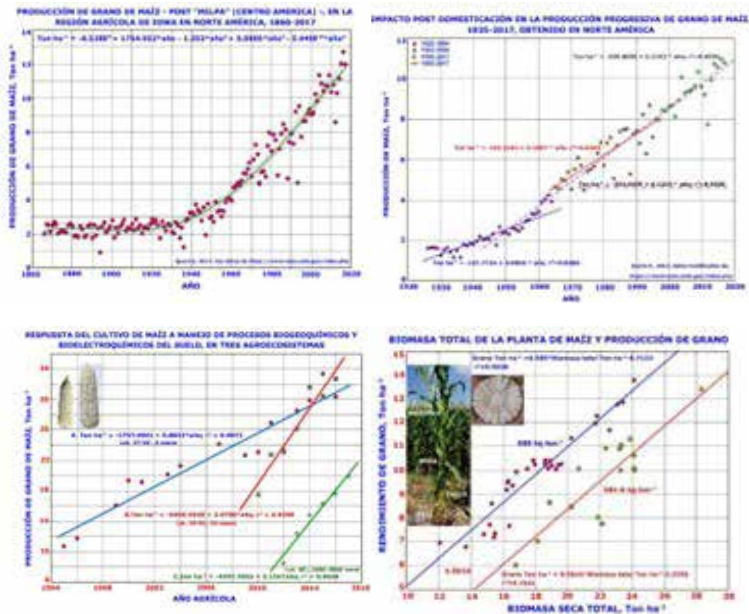
*: Por ciento de extracción de nutrientes por la cosecha de grano.

La siguiente gráfica muestra la productividad progresiva del cultivo de maíz con un manejo sustentable. Se observa la productividad lograda en tres agroecosistemas, incluyendo los nacionales.



El diagnóstico de la composición química elemental de la planta de maíz se emplea como base para observar el comportamiento de la productividad del cultivo.

Por otro lado, para mostrar que la productividad del cultivo de maíz es progresiva, ello por la capacidad ortogenética de la planta, se muestran las siguientes figuras y la interpretación matemática de este comportamiento:



Expresión matemática del comportamiento de la producción de maíz en la región agrícola de Iowa, USA, en el periodo 1864 a 2017.

1864 a 2017	$\text{Ton ha}^{-1} = -8.528\text{E}5 + 1754.952 \cdot \text{año} - 1.353 \cdot \text{año}^2 + 0.0005 \cdot \text{año}^3 - 5.949\text{E}-8 \cdot \text{año}^4$
Quero E. 2017. Con datos de https://www.nass.usda.gov/index.php	

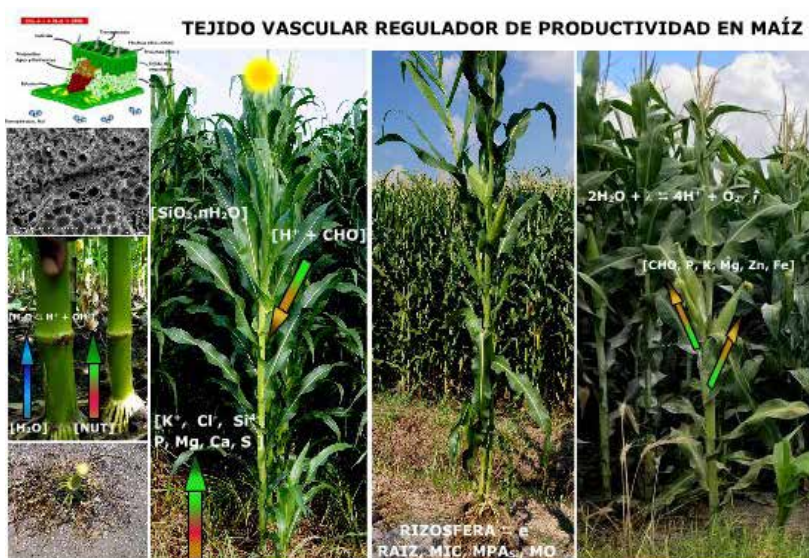
Productividad promedio a nivel nacional en EUA, 1925-2017.

Periodo	Productividad, $\text{Ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$
1925 a 1964	$\text{Ton ha}^{-1} = -127.7734 + 0.0669 \cdot \text{año}; r^2=0.8389$
1965 a 1995	$\text{Ton ha}^{-1} = -234.0495 + 0.1213 \cdot \text{año}; r^2=0.9390$
1996 a 2017	$\text{Ton ha}^{-1} = -193.1164 + 0.1007 \cdot \text{año}; r^2=0.6345$
1950 a 2017	$\text{Ton ha}^{-1} = -229.8856 + 0.1192 \cdot \text{año}; r^2=0.6025$
Quero E. 2017. Con datos de https://www.nass.usda.gov/index.php	

Productividad de maíz en tres regiones agroecológicas diferentes y altitudes. El manejo del cultivo es en los tres casos bajo riego.

Periodo	Latitud	Altitud	Ecuación de regresión
Años	Grados	msnm	Productividad, Ton ha ⁻¹ año ⁻¹
1996 a 2017	37°20'	2	Ton ha ⁻¹ = -1747.6061 + 0.8822*año; r ² = 0.9071
2017 a 2017	30°55'	50	Ton ha ⁻¹ = -4959.4548 + 2.4768*año; r ² = 0.9259
2012 a 2017	20°00'	1,800-2,000	Ton ha ⁻¹ = -4247.7653 + 2.1160*año; r ² = 0.9624
Quero E. 2017, http://www.ncga.com/for-farmers/national-corn-yield-contest , e investigación personal			

Eficiente	Grano Ton ha ⁻¹ = 0.5850*Biomasa total Ton ha ⁻¹ - 0.7133 r ² =0.9030
-Eficiente	Grano Ton ha ⁻¹ = 0.5816*Biomasa total Ton ha ⁻¹ - 3.2559 r ² =0.7641

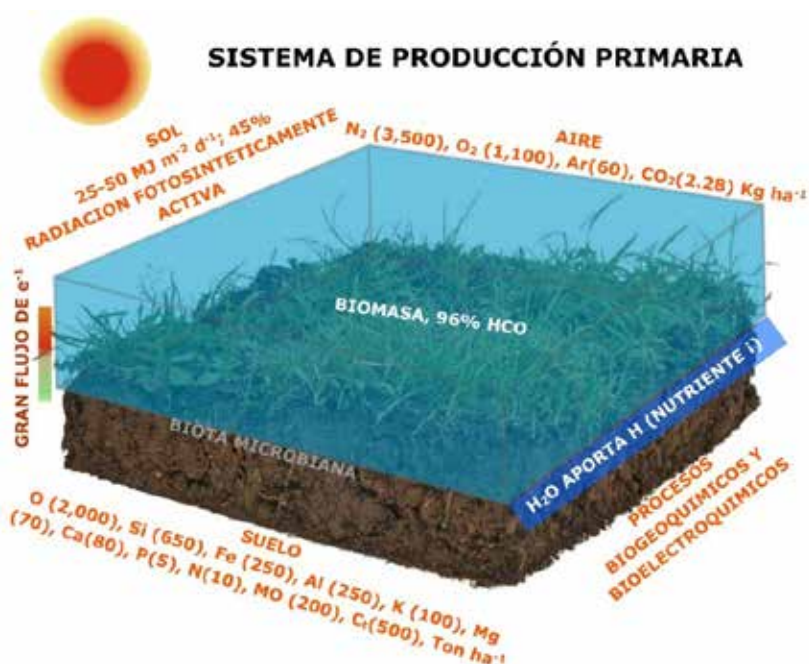


INTRODUCCIÓN

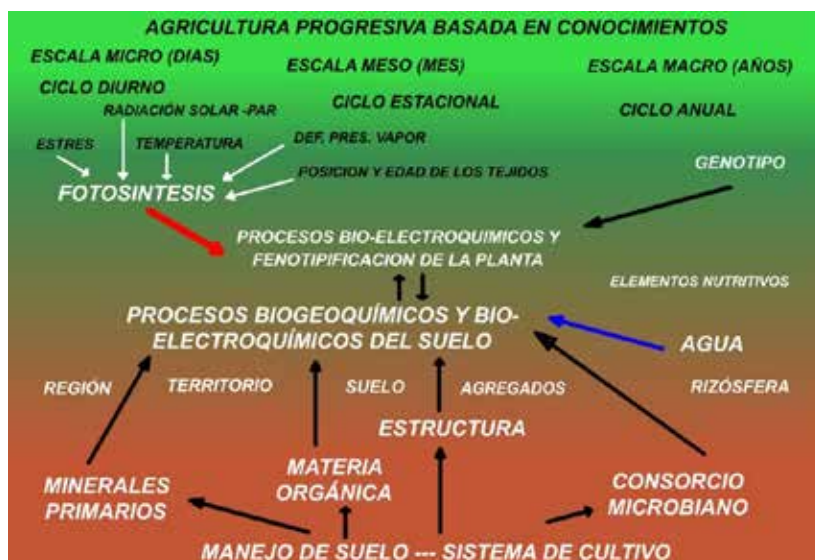
La producción agrícola actual requiere el empleo integral y sustentable de los recursos naturales disponibles y mantener equilibrio entre ellos para que no sean limitantes del crecimiento progresivo del desarrollo humano. Se debe destacar la importancia de desarrollar tecnología aplicada que integre diferentes áreas del conocimiento, como la biolo-

gía, química, geología y física y las transdisciplinarias como la biogeoquímica, bioelectroquímica y la ortogénesis, entre otras, que demanda el desarrollo progresivo y sustentable.

Iniciamos la discusión mostrando la siguiente figura, que ilustra la disponibilidad de recursos naturales y que interaccionan de manera dinámica con los procesos biológicos de la planta, los cuales le permiten concentrar los recursos agua, aire, suelo y energía solar, en unidades que definimos como biomasa. Esta concentración de recursos la denominamos productividad primaria neta (PPN), la cual posee propiedades para soportar el desarrollo de la cadena alimentaria de ecosistemas. En la siguiente figura se ilustra la integración de recursos en la PPN:



El cómo aprovechar los recursos y concentrarlos de manera progresiva en la producción agrícola es el objetivo de la tecnología agrícola. Los recursos naturales disponibles son: radiación solar, aire, agua, suelo y electrones, que componen los elementos químicos. Finalmente, la producción de biomasa (cosecha) agrícola es un concentrado de elementos –electrones que se arreglan dando origen a moléculas, organelos, células, tejidos, órganos e individuos (planta), los cuales se pueden reproducir, crecer y acumularse progresivamente en un tiempo determinado, originando la PPN–. La PPN depende de la posición geográfica (latitud, longitud, altitud) donde se realice, ya que esta posición se relaciona con las condiciones de clima (temperatura, humedad, precipitación y radiación solar). Armonizar estos recursos con los procesos biológicos es la meta de la producción agrícola; para ello requerimos que ocurran activamente procesos biogeoquímicos (geológicos + químicos + biológicos) y bioelectroquímicos (electroquímicos – REDOX – flujo de electrones – energía). Los procesos biológicos a los que nos referimos son: a) fotosíntesis, b) respiración; c) metabolismo primario y secundario. Estos procesos se presentan de manera general en la siguiente gráfica, en la cual se observa que el suelo, por su composición de átomos y electrones, es el principal recurso (patrimonio suelo) donde ocurre la producción agrícola, por lo que su manejo resulta vital para posibilitar el desarrollo sustentable de la humanidad. Los procesos de manejo del suelo tienen variación por región, hora, día, mes, años y cantidad de energía (radiación solar y biomasa como detonante de la movilidad de electrones contenidos en los átomos) y agua. Esto plantea que la actividad agrícola se debe desarrollar de manera preventiva, a tiempo y tener paciencia en la respuesta, ya que se involucran procesos químicos, biológicos y físicos que ocurren durante el manejo del suelo.



En presencia de agua, disolvente universal ($\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$) en los sistemas biológicos, ocurre la activación de la disolución incongruente de los minerales primarios del patrimonio suelo (MPPS). La activación se inicia con la captura de CO_2 de la atmósfera, que se une al agua para formar ácido carbónico, H_2CO_3 un ácido débil, que, al reaccionar con los MPPS, hace solubles a cationes como el K^+ , Ca^{2+} , etc. y forma bicarbonatos, como el $\text{K}(\text{HCO}_3)$, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Con la continua disolución se libera el silicio en la forma de ácido ortosilícico (H_4SiO_4), el cual reacciona con cationes formando una amplia diversidad de silicatos, como $\text{Ca}(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$ y $\text{K}_2(\text{H}_2\text{SiO}_4)$. Una vez disponibles los nutrientes en la fracción soluble del suelo, se activa el desarrollo del bioma microbiano ($\text{BIOMA}_{\text{microbiano}}$), que ocurre en la presencia de agua y oxígeno. El $\text{BIOMA}_{\text{microbiano}}$ se compone de un gran número de especies de microorganismos, de los cuales, en condiciones de buena productividad, sólo el 5% pueden ser causantes de daño biótico al ecosistema agrícola. Por ello resulta muy importante mantener una población adecuada de microorganismos que habiten el suelo. Por otro lado, para que el $\text{BIOMA}_{\text{microbiano}}$ y la biota del suelo se mantengan activos es importan-

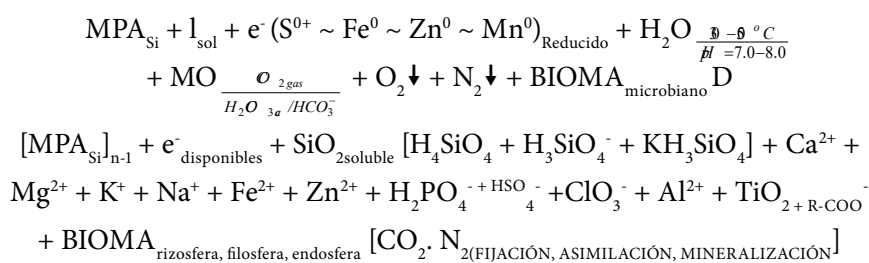
te contar con materia orgánica, que es la principal fuente de carbono y energía para su crecimiento y reproducción. Entre las funciones del *BIOMA*_{microbiano} está la disolución selectiva de nutrientes minerales, como fósforo, hierro, potasio, zinc. Asimismo, realizar metabolismo primario para obtener energía del sol y de estructuras diversas que contienen CHO (carbón, hidrógeno y oxígeno) que denominamos materia orgánica (MO). La MO, en sus uniones C-O-H, tienen energía que se libera a través de este metabolismo del *BIOMA*_{microbiano}. Otra función importante es la del metabolismo secundario, a través del cual se puede proveer de moléculas diversas con actividad biológica, que le permiten actuar como reguladores de bioma nocivo y/o inducir la adaptación del ecosistema ante la ocurrencia de factores ambientales adversos.

La materia orgánica (MO) es fundamental porque se compone principalmente de materiales sólidos y degradables que contienen sustancias ricas en carbono, oxígeno, hidrógeno y energía (movilidad de electrones en átomos de hidrógeno y oxígeno). La materia orgánica está compuesta por un 97% de CHO (llamados carbohidratos, de una manera genérica), el 3% restante son nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio, cloro. Para hacer disponible esta materia orgánica, para uso de los organismos vivos se requiere del oxígeno disponible el aire (21%). La energía disponible en la MO se obtiene por procesos de degradación ambiental y por biodegradación. La degradación ambiental ocurre con el tiempo y depende de las condiciones de temperatura, lluvia, radiación solar, suelo, siendo el extremo el consumo por fuego, esta degradación es pobre para su aprovechamiento por los ecosistemas. La biodegradación de la MO que ocurre mediante la acción del *BIOMA*_{microbiano} permite recuperar el 70% de la energía por el ecosistema.

El flujo de materia y energía en el suelo está regulado en los ecosistemas por procesos biogeoquímicos; que se refieren a la movilidad cíclica de elementos, C, H, O, N, P, Si y bioelectroquímicos que se refiere al movimiento de electrones; transformación de energía electromagnética en energía química y eléctrica, almacenamiento acumulativo en ecosiste-

mas vegetales). Las disciplinas biogeoquímica y bioelectroquímica son transdisciplinarias que han permitido ampliar las fronteras del conocimiento para comprender, con mayor atino, el proceso productivo del ecosistema agrícola, y poder predecir y ejecutar, de manera temprana, prácticas de manejo, enmiendas correctivas a corto y largo plazo, así como aportes propios del ecosistema, MPPS, $BIOMA_{microbiano}$ y MO.

En la siguiente expresión se ilustra el proceso biogeoquímico en el cual ocurre la movilidad de nutrientes de forma cíclica, cumpliendo con el principio de conservación de la masa o ley de Lavoisier “La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”:



MPA_{Si} son los más de 3,000 minerales primarios amorfos que se encuentran formando el suelo, los cuales tienen una composición base de O(50%), Si(26%), Al(5%), Fe(5%), Ti(0.25%), el resto (~13.75%) lo componen Ca, Mg, Zn, P, etc., referidos en el texto como MPPS.

X^0 , son elementos minerales ricos en electrones (e^{-}), por lo tanto, en estado químico reducido.

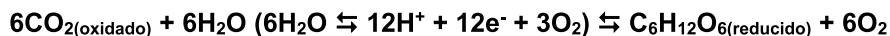
MO, materia orgánica, rica en estructuras CHO, que contienen energía disponible para su empleo en procesos metabólicos.

$[MPA_{Si}]_{n-1}$ indica que el mineral primario se disuelve de manera incongruente, a través de procesos biogeoquímicos, bioelectroquímicos y por la erosión, química, hídrica y ambiental.

BIOMA_{microbiano} es la amplia biodiversidad del bioma microbiano que se encuentra viviendo en el suelo y que aporta un gran número de procesos metabólicos, muchos de los cuales muestran alianza con la planta, formando la rizosfera, filosfera y endosfera.

SiO_{2soluble}. El silicio soluble y disponible para la planta se encuentra en la forma de ácido ortosilícico [H₄SiO₄].

La bioelectroquímica se ocupa de la movilidad de energía en el ecosistema mediada por el flujo de electrones. Ello significa que los elementos minerales pueden ceder y aceptar electrones, facilitando la movilidad de los átomos en sistemas acuosos. Como ejemplo tenemos al proceso de fotosíntesis, el cual ocurre a partir de la descomposición de agua vía fotólisis (se requieren cuantos de energía solar): $H_2O \rightleftharpoons 2H + \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$, en la que se obtienen electrones que serán almacenados en la molécula de glucosa de acuerdo con la siguiente ecuación:



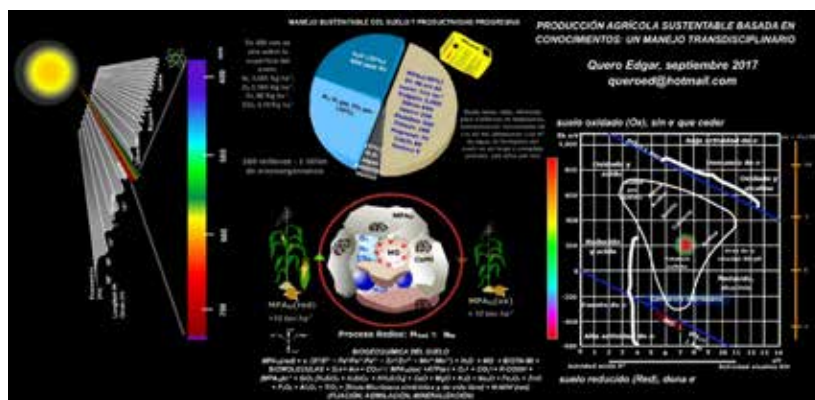
Las moléculas o átomos oxidados demandan o aceptan electrones y los reducidos pueden donar electrones. Este proceso de aceptar/donar electrones es caracterizado por la ecuación de Walther Nernst (1864-1941): Expresa el potencial de reducción de un átomo o molécula conjunto de ellos presentes en una matriz acuosa. El estado REDOX de la matriz la podemos medir en unidades eléctricas como es el voltaje, normalmente en el ecosistema se mide en milivols (mV).

x Oxidado + n e⁻ ⇌ y Reducido

$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \frac{a_{ox}^x}{a_{red}^y}$$

En la ecuación, E° es el potencial en condiciones estándar de presión y temperatura; R es la constante de los gases ideales, 8.3145 J (K*mol)⁻¹; F, la constante de Faraday, la carga de una mol de electrones, 95,484.56 C mol⁻¹; T es la temperatura en °K, y n es número de moles de electrones transferidos, según el balance de la ecuación. En general, podemos

establecer una escala de -500 a +500 mV. Las soluciones que se encuentran por debajo de cero tienen la capacidad de donar electrones, mientras que las de valor positivo aceptan electrones y/o demandan de electrones (requieren de energía). En el caso de un suelo con un REDOX mayor de 100, se establece que se encuentra oxidado y ha perdido electrones y debemos recuperarlos. En la agricultura sustentable debemos contar con suelos que no demanden de aportes de energía, ya que ello promoverá que el ecosistema haga ese aporte reduciendo la capacidad de acumulación de biomasa.

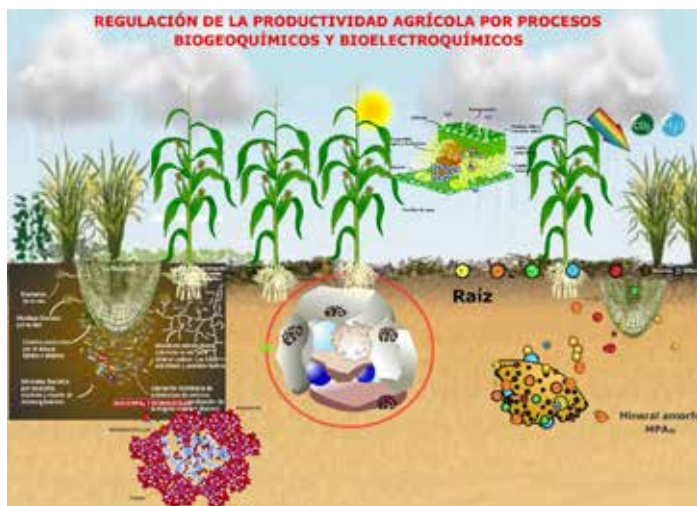


La integración de los recursos naturales para lograr la mejor PPN del ecosistema se ilustra en la siguiente figura destacando la acción de los procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos.

Es importante mencionar que el valor de E (mV) nos muestra la disponibilidad de electrones, pero estos requieren de un transportador y este es el H^+ , por ello la concentración de protones hidrógeno es factor para la transferencia de electrones ~ energía, y se puede expresar por la siguiente relación matemática: $rH = (REDOX + 200)/30 + 2 \cdot pH$. Esta corrección permite establecer una escala más precisa sobre la posibilidad de transferencia de energía, aunque finalmente la escala varía entre 0 y 42, estableciendo arbitrariamente, según la matriz de trabajo,

el valor medio de la propiedad de oxidante (logra donar energía) o de reductor (que puede aceptar energía).

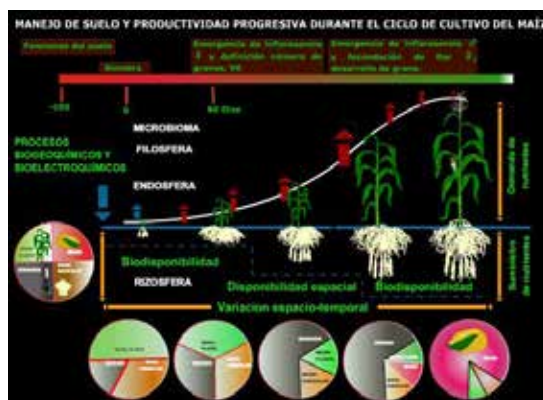
Las regulaciones de procesos productivos en el agroecosistema se ilustran en la siguiente gráfica, destacando que una buena respuesta sustentable y efectiva se logra empleando MO~líquida y MO~sólida, así como *BIOMA*_{microbiano} rico en microorganismos benéficos y minerales primarios ricos en silicio (PPSi), apoyados por biomoléculas capaces de donar electrones y las inductoras de solubilidad:



En la gráfica se muestra la gran actividad biogeoquímica y bioelectroquímica que se desarrolla en el patrimonio suelo (PS). Por ello se considera como un individuo (organismo) vivo, por lo que aquí lo trataremos así.

En el proceso productivo del agroecosistema, la PPN se regula por las siguientes acciones, naturales e inducidas. A manera de resumen, podemos establecer los componentes que permiten lograr éxito en la producción sustentable:

Meta	Acciones	%
Preparación del suelo	Promover la disolución de los componentes nutritivos, empleando procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos; descompactar y promover la oxigenación a través del intercambio de gases suelo-aire; promover la transferencia de electrones mediados por la MO, MP y <i>BIOMA</i> _{microbiano} y restaurar el suelo oxidado a un estado reducido, e incrementar captura y mineralización de N_2 , CO_2 , O_2 .	40
Manejo suelo-cultivo	Empleo de maquinaria para labores de cultivo; aireación, aporte de suelo (MP), suplir demandas específicas de nutrientes, manejo de arvenses (muchos aportes de exudados son importantes para la salud del suelo).	10
Genética de planta o semilla	Promover la expresión ontogenética del ecosistema para obtener las mejores características fenológicas, hábitos de crecimiento, componentes de rendimiento y demandas de nutrientes. Lograr una productividad progresiva.	10
Semilla o planta	Componentes genéticos, composición, distribución de tejidos de reserva, carbohidratos-proteínas y nutrientes minerales (P, K, Mg, Fe, Zn), sustancias antioxidantes y promotoras del crecimiento.	5
Germinación y establecimiento de cultivo	La semilla, al recibir agua en cuestión de horas, inicia la movilización de reservas y tendrá gran interacción con el <i>BIOMA</i> _{microbiano} propio y del ambiente. También le impactarán las condiciones de humedad y temperatura y el potencial REDOX. Por ello, la semilla se debe tratar para que este proceso inicial no sea agobiante y logre la expresión ortogenética (ortogénesis). Esta actividad permite posicionar al cultivo a baja, media o alta productividad. La mejor manera de regular este proceso es tratando a la semilla con los nutrientes minerales que le dan potencial a la semilla, como son P, K, Mg, Fe, Zn, Mn, productos con energía metabólica (biomoléculas y carbohidratos) y <i>BIOMA</i> _{microbiano} .	20
Manejo de la planta/cultivo	Aquí es importante establecer la densidad de siembra, para lograr un buen intercambio de gases (hoja-aire) para mayor asimilación de CO_2 , captura de radiación solar y respiración, factores responsables directamente de la productividad. Así como las actividades de protección fitosanitaria y corrección de nutrición mineral.	10
Manejo químico	Aplicación de nutrientes químicos y plaguicidas	5



En el siguiente párrafo describiremos el manejo sustentable del suelo.

EL PATRIMONIO SUELO Y SU MANEJO

El patrimonio suelo (PS) es el inicio y fin del desarrollo de procesos biológicos de los agroecosistemas en el planeta Tierra. Es un recurso “vivo y dinámico” inexorablemente ligado la PPN y la producción de alimentos para el desarrollo progresivo y sustentable, en equilibrio con la evolución global la vida, y por ello, la Salud del Suelo (SS) es motivo de preocupación para todos nosotros. La SS determina la Sostenibilidad de los Agroecosistemas (SSSA) y la intensidad de la de los procesos biológicos que soportan la vida y su medio ambiente. Un resultado del SSSA se expresa en el desarrollo progresivo de los agroecosistemas, observado una productividad y salud creciente de la cadena alimentaria, al ritmo del crecimiento de los ecosistemas. La SS afecta la sanidad de las plantas, los animales y los humanos. Han pasado ya más de 20 años desde el comienzo de un gran impulso de la ciencia del suelo, la agronomía y las comunidades de agricultura sostenible hacia el incremento de la conciencia y la comprensión de la importancia de la calidad y salud del suelo, para un futuro sostenible en los próximos 2,000 años. A principios de la década de 1990 se publicaron numerosas conferencias, informes y documentos que se centraron en definir, evaluar y monitorear la calidad y SS, enfatizando que el suelo era críticamente importante, no sólo para la producción de alimentos y materias primas, sino también para la función de mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global. La clave de estos conceptos fue la necesidad de considerar las múltiples funciones del suelo y de integrar plenamente los atributos físicos, químicos y biológicos que definen la función del suelo. En el caso de los sistemas agrícolas en particular, era necesario invertir años en la evaluación de la degradación y la capacidad productiva del suelo, por lo que los monitoreos del manejo del SS en corto plazo resultaron cruciales. Esto requería alejarse del foco casi exclusivo de una sola función del suelo y la producción de cultivos con la creencia que el suelo es un elemento inerte, y abarcar la importancia de todas las funciones del suelo. Recíprocamente, esto su-

puso un cambio de énfasis en la fertilidad química y la nutrición de las plantas, que había sido la norma en los sistemas agrícolas de las últimas décadas, a una mayor adopción de indicadores y análisis que incluían atributos biológicos, físicos y químicos que proporcionaran una imagen más completa de la salud y la función del suelo. Posteriormente, se ha hecho hincapié en el desarrollo e implementación de prácticas de manejo del suelo que promueven la salud y la sostenibilidad del suelo. Inherente en el concepto de salud del suelo están los patógenos y enfermedades del agroecosistema (especialmente las enfermedades transmitidas por el suelo) que permanecen suprimidas en suelos sanos. Aproximadamente el 5% del $BIOMA_{microbiano}$ total del suelo son patógenos. Por lo tanto, las prácticas de manejo que promueven la SS también deben promover intuitivamente niveles más bajos de patógenos y enfermedades. Pero ¿es siempre así? ¿Cuán efectivas son las prácticas asociadas con la SS para manejar o suprimir las enfermedades de las plantas? En este texto se resumirán investigaciones y avances logrados en los últimos 20 años con respecto a la salud del suelo, la sostenibilidad y las prácticas de manejo del suelo, con énfasis en sus implicaciones y efectos en las estrategias de manejo de la productividad progresiva y la supresión de factores bióticos y abióticos en los agroecosistemas. Los atributos del suelo que definen su función física, química y biológica se enlistan en la siguiente tabla:

ATRIBUTOS Y FUNCIONES DEL SUELO

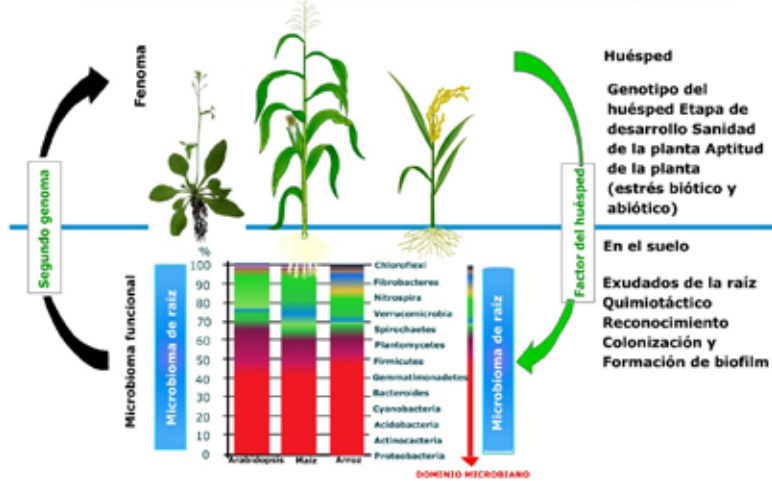
Parámetros funcionales del patrimonio suelo, para un proceso productivo y sustentable.

Físicos	Químicos	Biológicos
Materia orgánica, 5%	Materia Orgánica, $O/C \geq 1$	Carbón en $BIOMA_{microbiano}$
Textura, MPA_s , 42%, mineral secundario 3%	$pH, 6.5-7.5$	Captura de N_{2gas} , CO_2 , mineralización de N en $BIOMA_{microbiano}$
Profundidad, 45 cm	Conductividad eléctrica (CE), 500-900 $mS\ cm^{-1}$	Biomasa total de $BIOMA_{microbiano}$
Estructura, MO/(Arena + Limo)	Potencial óxido-reducción 50-150 mV	Respiración de raíz (O_2/CO_2)

Aireación, O_2 , N_2 , CO_2 , (25%)	Velocidad del ciclo biogeoquímico de nutrientes (Si, C, N, Fe, H, O, P, K, Mg, Na, Ca), Horas, días, años	Suelo-raíz- <i>BIOMA</i> _{microbiano} , emisión de $CO_2 \uparrow$ (~25 kg $ha^{-1} d^{-1}$, respiración) y demanda de $O_2 \downarrow$
Agua, Retención y volumen, (25%)	Disolución y disponibilidad de nutrientes para establecer la cadena <i>WEB</i>	Actividad de enzimas hidrolíticas: Peroxidasa, catalasa, proteasa, amilasa, fosfatasa, celulasa y enzimas REDOX: hidrogenasa
Densidad aparente, 1.4 g cm^{-3}, 4000 ton ha^{-1}	Disponibilidad de N mineralizado (N_{min}) $N_2 + N_{org} = NH_4^+ + NO_3^-$	Biodiversidad <i>BIOMA</i> _{microbiano} , aporte de genes y procesos metabólicos: fijadores entomopatógenos, promotores del crecimiento, inducción de inmunidad
Mineralogía de arcilla, ($O_{55}Si_{25}Fe_5Al_5(MgCaK)_5C_7$)	Concentración y disponibilidad de nutrientes para organismos fotosintéticos y <i>BIOMA</i> _{microbiano}	Evolución y desarrollo del proceso de biosilificación (cuerpos $SiO_2 \cdot nH_2O$)
Color	Silicio total 600-800 ton ha^{-1} y disponible en los sólidos disueltos, 250 kg ha^{-1} ,	Evolución y desarrollo del proceso de biocalcificación ($CaCO_3$, oxalato de Ca
Consistencia	Reducción, Fe^0, Zn^0, S^0	Biominales (Fitatos~P~K~Mg~Fe~Zn)
Velocidad de difusión, O_2 , CO_2 , N_2 , tamaño de poros	Carbón orgánico total, $RCOOH$,	Bioma fijador de nitrógeno atmosférico
Distribución del tamaño de partículas	Presencia de H_2O_2 y CH_3COOH	Diatomeas
Estabilidad de agregados	Fósforo disponible y total	Micorrizas
Infiltración, lixiviación	Aluminio disponible y total	Cuerpos de silicio
Disolución	Disolución incongruente de MPA_{sp} y gases CO_2/H_2CO_3	Exudados, (sideróforos), $RCOOH$, químicos-actividad

BIOMA MICROBIANO DEL SUELO

BIOTA MICROBIANA Y SELECCIÓN POR LAS CARACTERÍSTICAS DE LA RIZÓSFERA



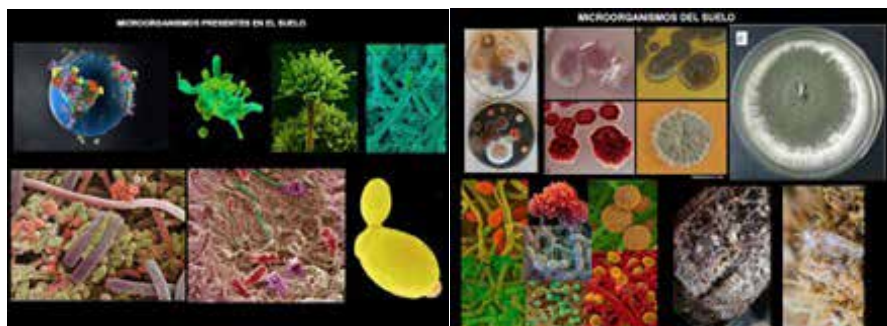
El **BIOMA_{microbiano}**, como parte fundamental de la SS, varía dependiendo el tipo de agroecosistema huésped, las condiciones REDOX, nutrición y factores ambientales del suelo, pero como indicador se encuentra la siguiente composición:

Número relativo del BIOMA _{microbiano} a 0-15 cm de profundidad del suelo, donde ocurre la mayor actividad		
Microorganismos	Número/g de suelo	Biomasa, g/m ²
Bacterias	10 ⁸ –10 ⁹	40–500 (0.4–5.0) *
Actinomicetos	10 ⁷ –10 ⁸	40–500 (0.4–5.0) *
Hongos	10 ⁵ –10 ⁶	100–1500 (1.0–15) *
Algas	10 ⁴ –10 ⁵	1–50 (0.01–0.5) *
Protozoarios	10 ³ –10 ⁴	Varios
Nematodos	10 ² –10 ³	Varios

*Ton ha⁻¹

En la figura anterior se ilustran algunas variantes entre agroecosistemas huésped de maíz, arroz y arábidsopsis. Noten que las proteobacterias son las más abundantes.

Algunos hábitos de crecimiento de los microorganismos del suelo:



SALUD DEL SUELO (ss)

Definición y características

La SS se ha definido de varias maneras a lo largo de los años, pero generalmente se puede resumir como la capacidad continua del suelo para funcionar como un sistema vivo, vital para sostener la PPN, mantener la calidad ambiental y promover la salud vegetal, animal y humana. Esta definición se desarrolló a partir de los conceptos y discusiones sobre la calidad del suelo de los años 90's. Aunque estos conceptos habían existido desde hace mucho tiempo, el interés renovado en el desarrollo y la implementación de la importancia de la SS para un futuro sostenible se inició en serio durante esta década. Después de decenios de enfocarse principalmente en los aspectos de fertilidad del suelo como medio físico para el crecimiento de las plantas, la degradación de los suelos en los agroecosistemas es reconocida como un obstáculo importante para la sostenibilidad de la PPN. La degradación o erosión de MPPS rebasó la pérdida de minerales, ahora el suelo demanda energía y electrones, que son aportados por las plantas a través de exudados que liberan en la rizosfera; entre más degradado esté un suelo, mayor es la demanda. Esto ha requerido de ampliar la frontera del manejo del SS aportando fuentes de energía y electrones como medida para regular los procesos bioelectroquímicos.

Aunque los términos calidad del suelo y SS se usan a menudo indistintamente, y ciertamente se desarrollan a partir de los mismos conceptos generales, hay diferencias. En general, la calidad del suelo se refiere a la aptitud específica de un suelo para un uso específico, mientras que la salud del suelo generalmente se refiere a aspectos más amplios y de múltiples funciones del suelo y hace hincapié en el suelo como un sistema vivo integrado y dinámico. Correspondiendo con ese énfasis, se da más enfoque en la biología del suelo. Los componentes biológicos del suelo, incluyendo las bacterias, los actinomicetos, los hongos, las algas, los protozoos, los nematodos, los ácaros, los insectos, las lombrices de tierra y los animales más grandes de la Tierra, así como las raíces de las plantas y las partes subterráneas de las plantas interactúan en lo que se denomina colectivamente como la rizosfera. La rizosfera es una red del sistema suelo-disponibilidad de nutrientes en un ambiente de flujo de energía y electrones (REDOX), los cuales son componentes críticos para la salud del suelo, afectan a la estructura del suelo, la erosión y la disponibilidad de agua, y son cruciales para el ciclo biogeoquímico de los nutrientes, la degradación de materia orgánica “muerta” y de secuestro y metabolismo de toxinas, y su conversión en moléculas activas para el desarrollo del agroecosistema. Así también actúan en la supresión de plagas, y son responsables de una gran proporción de la diversidad genética mundial, aunque muchas actividades de la actividad agrícola han contribuido a la pérdida de especies de plantas y microorganismos. El componente biológico del suelo y su importancia para la salud del suelo fueron olvidados en el pasado, en parte porque eran difíciles de medir o evaluar, pero también porque no se reconocía su valor, pero ello ha cambiado gracias a trabajos interdisciplinarios y transdisciplinarios que amplían las fronteras del diagnóstico, a través de técnicas de un amplio repertorio de conocimientos científicos, como la caracterización molecular de ADN y RNA, y la caracterización de sustancias que emplea el *BIOMA_{microbiano}* como precursores de metabolitos secundarios. Muchas de estas permiten la interacción (comunicación) entre planta-planta, planta-microorganismo y planta-suelo. Otra

herramienta importante son los equipos que cuantifican en minutos todos los elementos que componen el suelo, prácticamente se miden 99 elementos de la tabla periódica, de un total de 118. El diagnóstico de la SS es ahora mucho más específico y detallado sobre la estructura, función y cambios en el *BIOMA_{microbiano}* del suelo.

La SS también es un término apropiado porque se refiere no sólo al concepto de suelo como sistema vivo, sino también porque incorpora todas las facetas de los atributos geológicos, físicos, químicos, y biológicos (biogeoquímicos) del suelo, en un sistema holístico en el que todas sus propiedades y funciones son importantes. En general, hay varias funciones críticas que involucran a los suelos y son importantes en la SS. Estas incluyen a las funciones ecológicas de la producción de biomasa, que es fuente de alimento, materia prima y energía. La energía del Sol es asimilada por un sistema agua-minerales ricos en electrones-procesos biológicos, para producir alimentos, materia prima y bio-energía, ciclo de nutrientes, filtración y almacenamiento en *buffer*, almacenamiento y disponibilidad de agua. Los suelos también sirven como un hábitat biológico y una fuente de biodiversidad. Todo ello se suma a las funciones relacionadas con la actividad humana de servir como fuente de materias primas, soporte físico y apoyo a edificios, estructuras, etc., y preservar nuestro patrimonio cultural y arqueológico.

Debido a que representa interacciones complejas entre los componentes, no hay una versión ideal de un SS. Además, debido a que cada suelo tiene limitaciones determinadas por tipo de suelo y clima, y los suelos pueden ser muy diferentes, no hay un criterio que defina un SS. Sin embargo, hay varios atributos que son característicos de un SS. Estos incluyen: (A) altos niveles de materia orgánica, que estabiliza la estructura del suelo, proporciona energía-electrones y nutrientes y aumenta la fertilidad del suelo y las relaciones hídricas; (B) labranza (estructura suelta, friable), que apoya el establecimiento de cultivos y el crecimiento de raíces y plantas, y ayuda en el movimiento de aire y agua; (C) capacidad elevada de retención de agua y drenaje, que se traduce en alma-

cenamiento y suministro de agua y previene la acumulación de agua y la lixiviación de nutrientes; (D) un suministro adecuado y accesible de los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas y el mantenimiento en equilibrio el ciclo de los nutrientes (sin embargo, el exceso de nutrientes puede dar lugar a toxicidad, lixiviación, escorrentía y contaminación); (E) profundidad suficiente para el crecimiento de las raíces, para compensar las fluctuaciones climáticas y evitar las sequías y las inundaciones; F) grandes y diversas poblaciones de organismos benéficos del suelo, *BIOMA_{microbiano}*, necesarias para el ciclo de nutrientes, la descomposición, la estructura del suelo y la supresión de patógenos y plagas; y (G) poblaciones bajas de patógenos y malezas, para menores niveles de estrés de enfermedades y plantas. Además, los SS deben ser (H) resistentes a la degradación (capaces de soportar eventos adversos como la erosión, el exceso de precipitaciones, la sequía, etc.) y (I) resilientes en su capacidad para recuperarse de condiciones y tensiones desfavorables. Los suelos que no son saludables no están funcionando a su capacidad normal; tienen propiedades que limitan la productividad de los cultivos, la sostenibilidad y la calidad ambiental, y están limitados por problemas como erosión, compactación, estructura deficiente, retención pobre de agua y nutrientes, malezas y plagas.

Evaluación e indicadores

Debido a que la SS, al igual que la salud humana, representa la culminación de respuestas de muchas interacciones individuales y de redes, no hay un factor de medición que pueda utilizarse para evaluar la salud en general. Así como hay muchas medidas claves, como la temperatura, la presión arterial, la frecuencia del pulso, la química de la sangre, etc., que un médico utiliza como indicadores para tener una idea de la salud general de una persona, también hay muchos atributos diferentes que se requiere evaluar en la salud relativa de los suelos. Así, una vez establecidas las características básicas de la salud del suelo, el siguiente paso fue identificar los indicadores más importantes, útiles y confiables de salud del suelo que pudieran ser fácilmente medidos. Estos indica-

dores son necesarios para evaluar los parámetros de todos los aspectos de la calidad del suelo, incorporando los componentes geológicos, físicos, químicos y biológicos. Desde el principio, se propuso un conjunto básico de indicadores y conjuntos de datos mínimos para evaluar y monitorear la SS, y para los cuales se utilizarían metodologías y procedimientos estandarizados (aunque muchos aún son estadísticos-empíricos). Los atributos son representativos de importantes funciones de calidad del suelo y son sensibles a la gestión y los cambios detectados en periodos de tiempo relativamente cortos. Las metodologías de medición de estos atributos deben ser accesibles y fácilmente disponibles para la mayoría de las personas. Sin embargo, en la práctica, los investigadores y los agricultores han utilizado diferente conjunto de atributos como medida para evaluar la salud del suelo, lo que dificulta la normalización y la uniformidad. Los indicadores más utilizados y aceptados incluyen atributos físicos, tales como textura, profundidad de la capa arable, densidad aparente, infiltración, estabilidad de agregados y capacidad de retención de agua; los atributos químicos, como la materia orgánica total o en partículas (o el contenido total de materia orgánica y C, N), el pH, la conductividad eléctrica y el N, P y K extraíbles; los atributos biológicos generales, como la biomasa microbiana y el C - N, el N potencialmente mineralizarle (a una altura de 40 cm en una hectárea se encuentran disponibles las 24 horas del día, 3,500 kg de N₂), la respiración del suelo y las poblaciones de lombrices de tierra. Muchos trabajos se han centrado específicamente en la identificación de otros indicadores biológicos apropiados de la SS, incluyendo factores tales como poblaciones de grupos específicos o tipos de microorganismos, la estructura y actividad de las comunidades microbianas, las actividades de enzimas del suelo, la biodiversidad del suelo y las poblaciones de micro y macrofauna.

A lo largo de los años, estos y otros atributos se han combinado de diversas maneras para establecer programas particulares de evaluación de la salud del suelo. El kit de prueba de calidad del suelo y el uso de los cartas-descriptivas de calidad del suelo fueron desarrollados por el

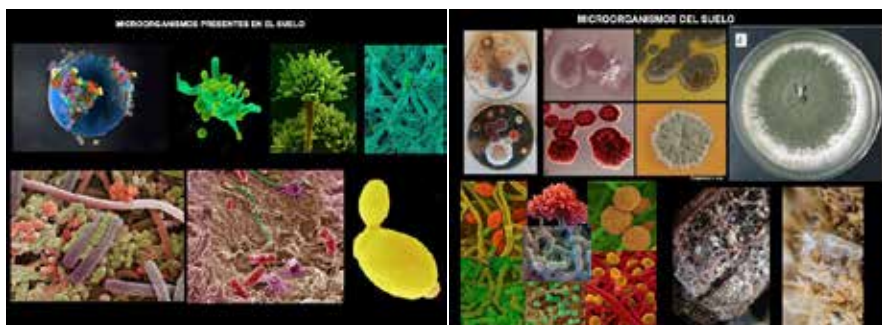
Instituto de Calidad del Suelo USDA-NRCS a finales de los años 90's y fue uno de los primeros programas de este tipo. Los kits y metodologías fueron diseñados para poder ser utilizados en campo por conservacionistas, agricultores, consultores de suelo y cultivo para una evaluación de campo de la calidad del suelo. Posteriormente, el USDA-NRCS incorporó el Índice de Acondicionamiento del Suelo (SCI), que se basa en los niveles de materia orgánica/carbono orgánico, en sus políticas y programas de conservación y medio ambiente. Aunque este índice es limitado porque se basa en un solo factor, el contenido de MO ha sido considerado el mejor factor, único para la evaluación debido a las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas y procesos geológicos en los que influye. El Marco de Evaluación de la Gestión del Suelo (SMAF) es una herramienta de aproximación basada en la medición que interpreta los datos físicos, químicos y biológicos del suelo y puede utilizarse para evaluar todos los tipos de sistemas de cultivo y los métodos de manejo. Un enfoque de indexación similar fue proporcionado en 2016 por la Agroecosystem Performance Assessment Tool (AEPAT), un programa informático diseñado para evaluar el desempeño agronómico y ambiental de las prácticas de manejo de suelos y cultivos. Más recientemente, se utiliza una versión simplificada del enfoque del SMAF en el programa de evaluación de la salud del suelo de Cornell, en el que se interpretan las evaluaciones estandarizadas de los indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo, evaluaciones que son accesibles, útiles, coherentes y económicas para los agricultores y administradores de la gestión del suelo, para tomar decisiones de manejo del suelo. El programa de evaluación de la salud de los suelos de Cornell incluye una calificación de salud de la raíz como parte de los parámetros biológicos medidos y es uno de los pocos programas de evaluación de la salud de los suelos que incluye una medida directa de la respuesta de las enfermedades de las plantas en sus evaluaciones de suelos. Estos y otros enfoques de evaluación se enfocan en la calidad dinámica del suelo, que es afectada y determinada por las prácticas recientes de manejo de cultivos y suelos, en contraposición a la calidad

inherente del suelo, que refleja las características inherentes del suelo (procesos de formación del suelo, materiales básicos, etc.) y es mucho más resistente al cambio. Numerosos investigadores han abordado la mejor forma de utilizar, analizar e implementar estas herramientas de evaluación y análisis para evaluaciones prácticas de la SS. En lo particular, nosotros hemos integrado la fenotipificación, química y biológica (fisiológica) de la planta durante su desarrollo, empleando en paralelo herramientas de evaluación en campo, con diagnóstico químico elemental y con microscopía electrónica. Con ello se ha logrado diseñar prácticas tecnológicas para la producción sustentable que abordaremos más adelante y establecer indicadores para cuantificar la salud general de agroecosistema, entendiendo que ello conducirá a una mayor PPN.

GESTIÓN DE LA SALUD DEL SUELO

Estrategias generales

Además de establecer las características generales de la SS, las evaluaciones y los indicadores pueden utilizarse para identificar áreas y parámetros específicos que deben mejorarse. Hay varias estrategias generales que deben tenerse en cuenta al tomar decisiones de gestión para lograr una mejor SS. Estos incluyen la remineralización con minerales primarios ricos en silicio (MPPS), como aporte de una carga importante de átomos y electrones en estado químico reducido, geológicamente mineral fresco. El aporte de la materia orgánica sólida y líquida, la minimización de grandes disturbios, la diversificación del *BIOMA*_{microbiano} del suelo, el mantenimiento de cultivos de cubierta y el mantenimiento de la cubierta vegetal tanto como sea posible (malezas como mejoradores de suelo). Estas estrategias básicas han sido el enfoque de las iniciativas de gestión de la salud del suelo que en los pasados 9 años realizamos en diferentes agroecosistemas. Además, para mejorar la sostenibilidad, las estrategias también pueden orientarse hacia el equilibrio entre la producción y la calidad ambiental y hacer un mejor uso de los recursos renovables frente a los no renovables. El seguimiento de procesos biogeoquímicos (ciclo



biogeoquímico del silicio ~ biosilificación) y bioelectroquímicos (potencial óxido-reducción) es una herramienta que apoya el diagnóstico para la gestión de la SS durante el ciclo anual de la PPN.

Administrar la materia orgánica

La materia orgánica sólida y líquida del suelo (en proceso de descomposición y estable) es uno de los indicadores primarios de la SS, es fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de los agroecosistemas y es el motor para el desarrollo de los ciclos biogeoquímicos en los cuales ocurre la transferencia de masa y energía. La gestión de la SS (y la mejora de la función del suelo) es en gran medida una cuestión de mantener un hábitat adecuado para la multitud de organismos que componen la biología del suelo. La MO es la principal fuente energía solar almacenada en estructuras orgánicas con alto contenido de CHO y minerales para el desarrollo del *BIOMA_{microbiano}* del suelo; adicionalmente, la MO del suelo tiene un efecto profundo en numerosas propiedades geológicas, físicas, químicas y biológicas del suelo, de tal forma que el manejo de la materia orgánica es crucial para mantener la SS. Además de proporcionar nutrientes y energía para el *BIOMA_{microbiano}*, la MO estabiliza la estructura del suelo y las relaciones hídricas (se usa aquí para referirse a todos los aspectos de infiltración de agua, almacenamiento, disponibilidad, etc.) y aumenta la disponibilidad y movilidad de nutrientes requeridos para el desarrollo del agroecosistema. Conservar y/o mantener los niveles existentes de MO es sólo el comienzo, ya que en la mayoría de los casos se requieren adiciones regulares de mate-

ria orgánica para activar, restaurar y mejorar los recursos del suelo. Aportes de MO líquida se pueden realizar con regularidad, ya que son biomoléculas de efecto rápido en actividad de la rizosfera. La MO puede agregarse a través de residuos de cultivos, rotaciones y cultivos de cobertura, así como a través de fuentes fuera del campo por enmiendas como compost, estiércol y en forma líquida vía biomoléculas-lixiviado. Las biomoléculas-lixiviado son un extracto acuoso de moléculas solubles de bajo peso molecular que se encuentran en gran abundancia en desechos como el estiércol vacuno (residuos de material vegetal biodegradable). Estas son una herramienta importante, ya que son el vehículo ideal para administrar de manera eficiente nutrientes-fertilizantes, bacterias y bio-supresores de factores bióticos y abióticos. La conservación de la MO puede mejorarse minimizando la labranza, manteniendo el crecimiento activo de los cultivos (periodos de barbecho más cortos), controlando la erosión y controlando el tráfico de campo, así como mediante la retención de residuos vegetales. El aumento del contenido de MO permite incrementar la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que promueve la disolución incongruente de los minerales primarios y secundarios; proporciona una condición física favorable para el crecimiento de las plantas; aumenta la capacidad de amortiguación física y química del suelo; estimula el desarrollo de la rizosfera; aumenta la biodiversidad del *BIOMA_{microbiano}* (se recupera biota nativa), y facilita el ciclo biogeoquímico de los nutrientes.

El *BIOMA_{microbiano}* aplicado al suelo aporta bióxido de carbono (CO_2), producto de la actividad metabólica del *BIOMA_{microbiano}*, al medio ambiente de la canopia del cultivo, esto es importante porque el aire que circula sobre el cultivo a 40 cm de altura contiene 2.5 kg de CO_2 por ha^{-1} . Aquí observamos que el proceso fotosintético de las plantas es un sistema altamente eficiente en la asimilación de CO_2 , por lo que cualquier aporte de la materia orgánica tendrá resultado en la mejora de la concentración de CO_2 en la PPN. Es importante destacar, que el cambio climático induce fuertemente cambios en la concentración de CO_2 en la canopia del agroecosistema, ello se debe a que con incrementos de la temperatura este gas

se eleva por arriba del área de aprovechamiento, causando un agobio e induce a que factores bióticos se establezcan en el agroecosistema.

Minimizar la labranza

La labranza en exceso puede causar alteraciones en las funciones físicas, químicas o biológicas de PS. Modifica el comportamiento de los organismos del suelo y los procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos, y disminuye el hábitat de los organismos del suelo, limitando así la función de la biología del suelo. Las alteraciones físicas incluyen la labranza y la compactación, así como la pérdida de la capa superficial del suelo por erosión. Por lo tanto, se prefieren operaciones reducidas, mínimas o no profundas, y es importante minimizar o controlar el tráfico de tractores en el campo y reducir la erosión. Las alteraciones químicas pueden reducirse mediante la eliminación o reducción de plaguicidas de amplio espectro u otros insumos químicos tóxicos. El sobrepastoreo es un ejemplo de un posible trastorno biológico que reduce la masa de las raíces, aumenta la escorrentía y aumenta la temperatura del suelo. Es importante que la labranza se aplique para promover el intercambio de gases del aire entre el ambiente y el suelo, para capturar nitrógeno atmosférico y mineralizarlo.

Diversificar la biota microbiana del suelo

Una biología activa y diversa del suelo es necesaria para la transferencia de masa y energía, en descomposición eficaz de la MO, el desarrollo de ciclos biogeoquímicos de nutrientes, la buena estructura del suelo para un eficiente intercambio de agua y gases y la supresión de patógenos y enfermedades, y la captura y mineralización de CO_2 y N_2 . La diversificación del *BIOMA_{microbiano}* del suelo es promovida por la liberación de moléculas que exudan (ácidos carboxílicos, carbohidratos, sideróforos, proteínas) una amplia diversidad de raíces de plantas nativas y cultivadas. La cantidad y especialidad de los exudados (rizodepósitos) les ha permitido el desarrollo a los agroecosistemas, un ejemplo de ello es el sistema de cultivo “milpa”, en el cual tres plantas, maíz, calabaza y frijol, se cultivan al mismo tiempo

para realizar un excelente manejo biogeoquímico y bioelectroquímico. La interacción de la raíz liberando rizodepósitos, el *BIOMA_{microbiano}* relacionándose con los rizodepósitos para realizar metabolismo primario y secundario, la MO como fuente de CHO y energía, y el suelo aportando nutrientes y hábitad, forman la rizosfera. De aquí que resulte ser de gran importancia para la PPN el incrementar la cantidad y diversidad del *BIOMA_{microbiano}*. Destacamos aquí que los exudados de la raíz tienen un gran efecto en la regulación de la expresión genética del metabolismo, de carbohidratos, aminoácidos, proteínas, expresión del RNA y metabolismo secundario (producción de antibióticos) del *BIOMA_{microbiano}*.

Algunas funciones de *BIOMA_{microbiano}* del suelo:

1. Degradan la materia orgánica; carbohidratos, celulosa, hemicelulosa, quitina, almidón, lignina, proteínas, grasas y ceras, ello a través de aportar gran cantidad de enzimas hidrolíticas.
2. Activan los procesos biogeoquímicos y el reciclado de nutrientes.
3. Crean sustancias húmicas y materia orgánica estable y enriquecen al suelo con sustancias con alto contenido de radical carboxilo (-COOH).
4. Producen una gran cantidad de moléculas de bajo peso molecular (volátiles) y mejoran la sanidad del ambiente a 40 cm de altura del suelo.
5. Mejoran la estructura del suelo y se incrementa la penetración de agua y el intercambio de gases.
6. Fijan y mineralizan N_2 , CO_2 y O_2 . En 40 cm sobre una hectárea del suelo se encuentran en promedio, 3,500 kg de N_2 , 1,100 kg de O_2 y 2.10 kg de CO_2 .
7. Promueven el crecimiento de la planta a través de moléculas con actividad hormonal y promotores de la expresión genética.
8. Controlan y suprimen el desarrollo de plagas y enfermedades del suelo.
9. Promueven la germinación y el desarrollo de la rizosfera.
10. Remueven contaminantes del suelo.
11. Se relacionan entre ellos a través de procesos simbióticos y no simbióticos (de vida libre)
12. Desarrollan procesos metabólicos primarios y secundarios para una mejor relación con su entorno y planta.

13. Reducen la pérdida de carbono y apoyan la captura y su almacenamiento.
14. Mejoran la descompactación y el drenaje del suelo.
15. Inducen el proceso REDOX y movilidad de energía metabólica.
16. Incrementan la concentración de iones hidrógeno con energía y apoyan la nutrición de este elemento número uno en la composición de la planta.
17. Estimulan la producción de proteínas intrínsecas de la membrana plasmática (acuaporinas).
18. Participan en la solubilización de nutrientes en la disolución incongruente de los minerales del patrimonio suelo.
19. Forman agregados con los minerales primarios y la materia orgánica en proceso de descomposición y la estable.

EL BIOMA_{MICROBIANO} QUE SE REPORTA QUE PUEDE ESTAR EN EL SUELO ES:

I: Principales géneros de microorganismos presentes en el suelo (ordenados según frecuencia observada).

11	Pseudomonas	4	Acinetobacter	3	Actinoplanes	3	Methanosarcina
11	Rhizobium	4	Aeromicrobium	3	Afipia	3	Methylophilus
10	Flavobacterium	4	Aurantimonas	3	Alicyclobacillus	3	Micrococcus
10	Sphingomonas	4	Azoarcus	3	Aminobacter	3	Noviherbaspirillum
8	Methylobacterium	4	Azospirillum	3	Anabaena	3	Ochrobactrum
8	Streptomyces	4	Bdellovibrio	3	Aquabacterium	3	Phycococcus
8	Variovorax	4	Bosea	3	Arenimonas	3	Pigmentiphaga
7	Acidovorax	4	Cellulomonas	3	Asticcacaulis	3	Planctomyces
7	Bacillus	4	Cellvibrio	3	Brevibacterium	3	Pseudonocardia
7	Bradyrhizobium	4	Chitinophaga	3	Calothrix	3	Pseudoxanthomonas
7	Chryseobacterium	4	Clostridium	3	Cohnella	3	Rathayibacter
7	Devosia	4	Desulfurivibrio	3	Comamonas	3	Rhodanobacter
7	Mesorhizobium	4	Dokdonella	3	Curtobacterium	3	Rhodobacter
7	Microbacterium	4	Duganella	3	Curvibacter	3	Rhodocyclus
7	Nocardioides	4	Exiguobacterium	3	Dechloromonas	3	Rhodoplanes
7	Rhodococcus	4	Herbaspirillum	3	Deinococcus	3	Roseomonas
6	Arthrobacter	4	Hymenobacter	3	Delftia	3	Schlegelella
6	Burkholderia	4	Hyphomicrobium	3	Dyadobacter	3	Shinella

6	Massilia	4	Janthinobacterium	3	Ensifer	3	Skermanella
6	Mycobacterium	4	Limnobacter	3	Enterobacter	3	Sphingobacterium
6	Paenibacillus	4	Methylibium	3	Flavisolibacter	3	Spirosoma
6	Pedobacter	4	Methylothera	3	Frigoribacterium	3	Sporosarcina
6	Phenylobacterium	4	Pelomonas	3	Gemmatimonas	3	Syntrophobacter
6	Stenotrophomonas	4	Ralstonia	3	Geobacillus	3	Thermomonas
5	Brevundimonas	4	Rhizobacter	3	Geobacter	3	Thiobacillus
5	Caulobacter	4	Sphingopyxis	3	Hoeflea	3	Zoogloea
5	Clavibacter	4	Staphylococcus	3	Kaistia		
5	Erwinia	4	Xanthomonas	3	Kineococcus		
5	Lysobacter			3	Lactococcus		
5	Novosphingobium			3	Leifsonia		
5	Pantoea			3	Magnetospirillum		
5	Polaromonas			3	Marmoricola		
5	Sphingobium			3	Methanobacterium		

II. Principales géneros de microorganismos presentes en el suelo (ordenados según frecuencia observada).

2	Achromobacter	2	Corynebacterium	2	Labrys	2	Phormidium
2	Actinocorallia	2	Crocinitomix	2	Lawsonia	2	Planococcus
2	Actinomyces	2	Cupriavidus	2	Leptonema	2	Plantibacter
2	Aifella	2	Cytophaga	2	Leptospira	2	Polynucleobacter
2	Agrobacterium	2	Desulfobacca	2	Leptothrix	2	Propionivibrio
2	Agromyces	2	Desulfobacterium	2	Loktanella	2	Pseudoalteromonas
2	Alcaligenes	2	Desulfobulbus	2	Limnohabitans	2	Ramlibacter
2	Alicyciphilus	2	Desulfococcus	2	Methanosaeta	2	Rheinheimera
2	Altererythrobacter	2	Desulfomonile	2	Methanospirillum	2	Rhodoferrax
2	Amaricoccus	2	Desulfosporomusa	2	Methylocaldum	2	Rhodomicrobium
2	Ammoniphilus	2	Desulfosporosinus	2	Methylocella	2	Rhodopseudomonas
2	Amycolatopsis	2	Desulfotalea	2	Methylomonas	2	Rhodospirillum
2	Anaerofustis	2	Dickeya	2	Methylosinus	2	Roseobacter
2	Anaeromyxobacter	2	Dinoroseobacter	2	Methyloversatilis	2	Roseovarius
2	Anaerovora1	2	Erythrobacter	2	Methylovorus	2	Saccharomonospora
2	Aquicella	2	Escherichia	2	Micromonospora	2	Serratia
2	Ardenscatena	2	Fimbriimonas	2	Microscilla	2	Shewanella

2	Asaia	2	Fluviicola	2	My1ococcus	2	Smithella
2	Azospira	2	Fusibacter	2	Nakamurella	2	Sorangium
2	Beggiatoa	2	Fusobacterium	2	Nannocystis	2	Spirochaeta
2	Bifidobacterium	2	Gemmata	2	Nevskia	2	Starkeya
2	Blastococcus	2	Geodermatophilus	2	Niastella	2	Steroidobacter
2	Blastomonas	2	Geothrix	2	Nitrosomonas	2	Sterolibacterium
2	Blastopirellula	2	Gluconacetobacter	2	Novispirillum	2	Stigmatella
2	Bordetella	2	Haiscomenobacter	2	Oligotropha	2	Sulfuritalea
2	Brevibacillus	2	Halomonas	2	Opitutus	2	Telmatospirillum
2	Caldilinea	2	Herminiimonas	2	Oxobacter	2	Terrabacter
2	Caloramator	2	Hydrocarboniphaga	2	Pandoraea	2	Thauera
2	Chondromyces	2	Hydrogenophaga	2	Parvibaculum	2	Thermoactinomyces
2	Chthoniobacter	2	Hyphomonas	2	Pectobacterium	2	Thermomicrobium
2	Citrobacter	2	Klebsiella	2	Pedomicrobium	2	Thermosinus
2	Collimonas	2	Kozakia	2	Pelotomaculum	2	Treponema
2	Conexibacter	2	Kribbella	2	Peredibacter	2	Turneriella
						2	Uliginosibacterium
						2	Vibrio
						2	Wolinella

III. Principales géneros de microorganismos presentes en el suelo (ordenados según frecuencia observada).

1	Acetivibrio	1	Arcticibacter	1	Catenulispora	1	Desulfoglaeba
1	Acetobacter	1	Arcobacter	1	Catenuloplanes	1	Desulfoluna
1	Acetonema	1	Armatimonas	1	Cecembia	1	Desulfomicrobium
1	Accumulibacter	1	Aromatoleum	1	Chelativorans	1	Desulforegula
1	Acidiphilium	1	Arthronema	1	Chelatococcus	1	Desulforhabdus
1	Acidiferrobacter	1	Arthrospira	1	Chitinimonas	1	Desulforhopalus
1	Acidisphaera	1	Arsenophonus	1	Chitinivibrio	1	Desulfuridis
1	Acidobacterium	1	Aspromonas	1	Chloroflexus	1	Desulfosalsimonas
1	Acidothermus	1	Asteroleplasma	1	Chloronema	1	Desulfosoma
1	Actinobacterium	1	Aureimonas	1	Chrysiogenes	1	Desulfospira
1	Actinotalea	1	Aureispira	1	Chthonomonas	1	Desulfovirga
1	Advenella	1	Aureitalea	1	Coprococcus	1	Desulfurispora
1	Adhaeribacter	1	Azohydromonas	1	Coralimargarita	1	Desulfuromonas

1	Agaricicola	1	Azorhizobium	1	Co1iella	1	Dethiosulfovibrio
1	Albidiferax	1	Azovibrio	1	Craurococcus	1	Dichelobacter
1	Agreia	1	Balneimonas	1	Crenothri1	1	Diplorickettsia
1	Algoriphagus	1	Bartonella	1	Cyanobium	1	Dolichospermum
1	Alishewanella	1	Bacteriovora1	1	Cyanothece	1	Dongia
1	Allochroematium	1	Belnapia	1	Cylindrospermopsis	1	Ectothiorhodosinus
1	Alkalibaculum	1	Beijerinckia	1	Cystobacter	1	Elusimicrobium
1	Alkanibacter	1	Beutenbergia	1	Cryomorpha	1	Endobacter
1	Anaerococcus	1	Bilophila	1	Cryptanaerobacter	1	Enterococcus
1	Anaerolinea	1	Blautia	1	Dactylosporangium	1	Emticicia
1	Anaerostipes	1	Brachy bacterium	1	Deefgea	1	Erythromicrobium
1	Anammoxoglobus	1	Brocadia	1	Deferribacter	1	Ethanoligenens
1	Anaplasma	1	Brucella	1	Dehalobacter	1	Eubacterium
1	Angiococcus	1	Buchnera	1	Dehalobacterium	1	Euzebya
1	Andersenella	1	Bryantella	1	Dehalogenimonas	1	Faecalibacterium
1	Andreprevotia	1	Buttiauxella	1	Deinonema	1	Falsibacillus
1	Aphanizomenon	1	Byssovorax	1	Demequina	1	Fastidiosipila
1	Aquabacter	1	Caloribacterium	1	Desertibacter	1	Ferribacterium
1	Aquaspirillum	1	Camelimonas	1	Desulfatitalea	1	Ferrirophicum
1	Aquifelleum	1	Carbo1ydotherrnus	1	Desulfitebacter	1	Ferrovum
1	Aquimonas	1	castellaniella	1	Desulfiteobacterium	1	Fibrisoma
1	Aquisphaera	1	Catellibacillus	1	Desulfoconvexum	1	Flavonifractor
1	Aquitalea	1	Catellatospora	1	Desulfocurvus	1	Flectobacillus

IV. Principales géneros de microorganismos presentes en el suelo (ordenados según frecuencia observada).

1	Flexithrix	1	Kangiella	1	Marteella	1	Nitrospina
1	Fontibacillus	1	Kerstesia	1	Methanocella	1	Nostoc
1	Formivibrio	1	Kineosporia	1	Methanocorpusculum	1	Nubsella
1	Frankia	1	Kitasatospora	1	Methanoculleus	1	Oceanibacterium
1	Fremyella	1	Koribacter	1	Methanoregula	1	Oerskovia
1	Fulvimarina	1	Kouleoethrix	1	Methanosphaerula	1	Oleiphilus
1	Gallionella	1	Ktedonobacter	1	Methanothermobacter	1	Oligosphaera
1	Geothalkalibacter	1	Kuenenia	1	Methylobacillus	1	Oribacterium
1	Geopsychrobacter	1	Kytococcus	1	Methylobacter	1	Orientia

1	Georgfuchsia	1	Labrenzia	1	Methylococcus	1	Oscillochloris
1	Geothermobacter	1	Laribacter	1	Methylocystis	1	Oscillospira
1	Gilvibacter	1	Leadbetterella	1	Methylogaea	1	Owenweeksia
1	Glaciecola	1	Legionella	1	Methylochromium	1	Oxalicibacterium
1	Gordonia	1	Leminorella	1	Methylopila	1	Oxalobacter
1	Gracilibacter	1	Lentisphaera	1	Methylovirgula	1	Paenisporosarcina
1	Granulibacter	1	Lentzea	1	Microcystis	1	Paludibacter
1	Grimontia	1	Leptolinea	1	Microcystis	1	Paludibacterium
1	Hafnia	1	Leptolyngbya	1	Microvirga	1	Panacagrimonas
1	Halocella	1	Lonsdalea	1	Modestobacter	1	Parachlamydia
1	Halothiobacillus	1	Limothrix	1	Modicisalibacter	1	Paracoccus
1	Helicobacterium	1	Listonella	1	Moryella	1	Patulibacter
1	Herpetosiphon	1	Litorilinea	1	Mucilaginibacter	1	Paucibacter
1	Hirschia	1	Longilinea	1	Mycoplasma	1	Paucimonas
1	Holophaga	1	Luteimonas	1	Mycoplasma	1	Pelagibacterium
1	Humitalea	1	Luteolibacter	1	Natronocella	1	Pelagibius
1	Hydrogenoanaerobacterium	1	Lutibaculum	1	Naxibacter	1	Phaeosporillum
1	Hylemonella	1	Lutispora	1	Neoasasia	1	Pelobacter
1	Iamia	1	Lysinibacillus	1	Neochlamydia	1	Pelospira
1	Ideonella	1	Macromonas	1	Niabella	1	Persicirhabdus
1	Ignavibacterium	1	Magnetospora	1	Nisaea	1	Phascolarctobacterium
1	Inquilinus	1	Magnetococcus	1	Nitratifactor	1	Phycisphaera
1	Isosphaera	1	Malonomonas	1	Nitricola	1	Phyllobacterium
1	Janibacter	1	Marisediminicola	1	Nitrobacter	1	Pirellula
1	Jeotgalibacillus	1	Marispirillum	1	Nitrospira	1	Piscinibacter
1	Jonesia	1	Marinobacter	1	Nitrosococcus	1	Piscirickettsia
1	Kaistobacter	1	Marivirga	1	Nitrosospira	1	Planifilum

V. Principales géneros de microorganismos presentes en el suelo (ordenados según frecuencia observada).

1	Pleomorphomonas	1	Roseosporillum	1	Solitalea	1	Thermococcoides
1	Plesiocystis	1	Rosenbergiella	1	Solimonas	1	Thermodesulfurhabdus
1	Pontibacter	1	Rothia	1	Sphaerochaeta	1	Thermodesulfovibrio
1	Prochlorococcus	1	Rubellimicrobium	1	Sphingorhabdus	1	Thermo flavimicrobium

1	Propionispira	1	Rubrivivax	1	Sphingosinicella	1	Thermoflexus
1	Prostheco bacter	1	Rubrobacter	1	Sporacetigenium	1	Thermoleophilum
1	Proteiniclasticum	1	Rudaea	1	Streptococcus	1	Thermosporothrix
1	Protochlamydia	1	Rudanella	1	Streptosporangium	1	Thermosynechococcus
1	Providencia	1	Rugamonas	1	Succiniclasticum	1	Thermovum
1	Pseudacidovora1	1	Ruminococcus	1	Succinispira	1	Thioalbus
1	Pseudaminobacter	1	Runella	1	Sulfolobus	1	Thioalkalibacter
1	Pseudolabrys	1	Saccharofermentans	1	Sulfuricella	1	Thiococcus
1	Pseudorhodobacter	1	Saccharophagus	1	Sulfuricurvum	1	Thioflavicoccus
1	Pseudovibrio	1	Sagittula	1	Sulfurospirillum	1	Thiomonas
1	Pseudo1anthobacter	1	Salinibacterium	1	Symbiobacterium	1	Tistrella
1	Puniceispirillum	1	Sandaracinobacter	1	Synechococcus	1	Trichodesmium
1	Pusillimonas	1	Sandarakinorhabdus	1	Synechocystis	1	Tolomonas
1	Quadrisphaera	1	Schlesneria	1	Syntrophobotulus	1	Trabulsiella
1	Rahnella	1	Sedimentibacter	1	Syntrophomonas	1	Tsukamurella
1	Raphidiopsis	1	Sediminibacillus	1	Syntrophothermus	1	Truepera
1	Renibacterium	1	Sediminibacterium	1	Syntrophus	1	Tumebacillus
1	Rhodoblastus	1	Segetibacter	1	Tardiphaga	1	Verminephrobacter
1	Rhodocista	1	Shimazuella	1	Telluria	1	Verrucomicrobium
1	Rhodocytophaga	1	Shuttleworthia	1	Tepidamorphus	1	Virgibacillus
1	Rhodoligotrophos	1	Siderolydans	1	Tepidiphilus	1	Virgisporangium
1	Rhodonellum	1	Silicibacter	1	Terasakiella	1	Vogesella
1	Rhodopirellula	1	Simkania	1	Terracoccus	1	Vulcanibacillus
1	Rhodotalassium	1	Simplicispira	1	Terrimonas	1	Vulcanithermus
1	Rhodovarius	1	Singularimonas	1	Thalassobaculum	1	Waddlia
1	Rickettsia	1	Singulisphaera	1	Thermacetogenium	1	Wandonia
1	Rickettsiella	1	Sinorhizobium	1	Thermanaeromonas	1	Wautersia
1	Robiginitomaculum	1	Snowella	1	Thermincola	1	Williamsia
1	Roseburia	1	Sodalis	1	Thermithiobacillus	1	Woodsholea
1	Roseivirga	1	Solibacter	1	Thermoanaerobacter	1	Xanthobacter
1	Roseifellus	1	Solibacillus	1	Thermobacillus	1	Xylophilus
1	Roseococcus	1	Solirubrobacter	1	Thermobrachium	1	Yersinia
						1	Yokenella
						1	Zavarzinella
						1	Zymomonas
						1	Zymophilus

Tipo de microorganismos implicados en las diferentes etapas del manejo de la MO para compostaje.

Fase del composteo	Microorganismo	Tipo
Termofílica el comienzo del proceso de compostaje (inmediatamente después del pico de calor)	<i>Rhabditidae sp.</i>	Nematodo
	<i>Panagrolaimidae sp.</i>	Nematodo
	<i>Diplogasteridae sp</i>	Nematodo
	<i>Cephalobidae sp</i>	Nematodo
En el enfriamiento y maduración del procedimiento de compostaje	<i>Mononchoides sp</i>	Nematodo
	<i>Dytilenchus filimus</i>	Nematodo
Mesofílica (compostaje antes de mezclar la pila)	<i>Bacillus sp.</i>	Bacteria
	<i>Paenibacillus sp.</i>	Bacteria
	<i>Actinomycetes</i>	Filamentosa Bacteria
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Hongo
Final del proceso de compostaje (muestreo en diferentes puntos)	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Hongo
	<i>Emericella sp.</i>	Hongo
	<i>Aspergillus ochraceus</i>	Hongo
	<i>Aspergillus terreus</i>	Hongo
	<i>Penicillium oxalicum</i>	Hongo
En el enfriamiento y maduración	<i>Thermoactinomyces sp.</i>	Levadura
Mesofílico	<i>Pseudomonas sp.</i>	Bacteria
	<i>Azotobacter sp.</i>	Bacteria
	<i>Azospirillum sp.</i>	Bacteria
	<i>Bacillus sp.</i>	Bacteria
Mesofílica y termofílica	<i>Chaetomium sp.</i>	Hongo
	<i>Thermophile sp.</i>	Hongo
	<i>Malbranchea sulfurea</i>	Hongo
	<i>Thermomyces lanuginosus</i>	
	<i>Torula thermophila</i>	
Mesofílico	<i>Feacal coliformes</i>	Bacteria
	<i>Streptococcus sp.</i>	Bacteria
	<i>Proteus sp.</i>	Bacteria
	<i>Serratia sp.</i>	Bacteria
	<i>Bacillus sp.</i>	Bacteria

Termofílica	<i>Aspergillus sp.</i>	Hongo
	<i>Fusarium sp.</i>	Hongo
	<i>Penicillium sp.</i>	Hongo
	<i>Humicola sp.</i>	Hongo
	<i>Mycothypha sp.</i>	Hongo
	<i>Scopulariopsis sp.</i>	Hongo
	<i>Cephalosporium sp.</i>	Hongo
	<i>Trichothesium sp.</i>	Hongo
Etapas de enfriamiento	<i>Aspergillus sp.</i>	Hongo
	<i>Fusarium sp.</i>	Hongo
	<i>Penicillium sp.</i>	Hongo
	<i>Cladosporium sp.</i>	Hongo
	<i>Mycothypha sp.</i>	Hongo
	<i>Scopulariopsis sp.</i>	Hongo
	<i>Coprinus sp.</i>	Hongo
	<i>Cephalosporium sp.</i>	Hongo
	<i>Trichothecium sp.</i>	Hongo
En el proceso de enfriamiento del compostaje	<i>Escherichia coli</i>	Bacteria
Mesofílica y termofílica	<i>Streptococcus sp.</i>	Bacteria
En el resto del ciclo de compostaje	<i>Bacillus sp.</i>	Bacteria
Termofílica	<i>Absidia ramosa</i>	
	<i>Allescheria terrestris</i>	
	<i>Mucor pusillus</i>	
	<i>Chaetomium thermophilum</i>	
	<i>Talaromyces thermophilis</i>	
	<i>Aspergillus fumigatus</i>	
	<i>Humicola insolens</i>	
	<i>Humicola lanuginosa</i>	
	<i>Lenzites sp.</i>	
	<i>Penicillium duponti</i>	
	<i>Scytalidium thermophilum</i>	
	<i>Sporotrichum thermophile</i>	
Mesofílico	<i>Allescheria terrestris</i>	Ascomicetos
	<i>Chaetomium sp.</i>	
	<i>Dasyscypha sp.</i>	
	<i>Emericella nidulans</i>	

	<i>Mollisia</i> sp.	
	<i>Thermoascus aurantiacus</i>	
	<i>Armillaria mellea</i>	Basidiomicetos
	<i>Clitopilus insitus</i>	
	<i>Coprinus cinereus</i>	
	<i>Fomes</i> sp.	
	<i>Lentinus lepiakus</i>	
	<i>Lenzites trabea</i>	
	<i>Pleurotus ostreatus</i>	
	<i>Polyporus versicolor</i>	
	<i>Alternaria tenuis</i>	Deuteromicetes
	<i>Artrobotrys oligospora</i>	
	<i>Aspergillus amstelodami</i>	
	<i>Aspergillus</i> sp.	
	<i>Botryotrichum piluliferum</i>	
	<i>Cephalophora tropica</i>	
	<i>Cephalosporiopsis alpina</i>	
	<i>Cephalosporium</i> sp.	
	<i>Cephalosporium</i> sp.	
	<i>Cephalosporium</i> sp.	
	<i>Cephalosporium</i> sp.	
	<i>Cladosporium herbarum</i>	
	<i>Doratomyces</i> sp.	
	<i>Geotrichum candidum</i>	
	<i>Gliocladium</i> sp.	
	<i>Gliomastox murorum</i>	
	<i>Graphium</i> sp.	
	<i>Harpographium</i> sp.	
	<i>Leptographium lundbergii</i>	
	<i>Paecilomyces</i> sp.	
	<i>Penicillium</i> sp.	
	<i>Penicillium</i> sp.	
	<i>Phlyctaena</i> sp.	
	<i>Rhinocladiella artrovirens</i>	
	<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	
	<i>Scopulariopsis</i> sp.	

	<i>Sporotrichum thermophile</i>	
	<i>Stachybotrys sp.</i>	
	<i>Trichoderma viride</i>	

Bacterias que solubilizan nutrientes.

No.	BACTERIA	SOLUBILIZAN					PRODUCEN
		N	P	K	Fe	MO	ÁCIDOS ORGÁNICOS
1	Rhizobacteria	✓	–	–	–	✓	–
2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> BS8	✓	✓	–	✓	–	Cianhídrico
3	<i>Bradyrhizobium diazoefficiens</i> USDA110 and <i>B.japonicum</i> THA6	✓	–	–	–	✓	–
4	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> Azotobacter chroococcum <i>Azospirillum brasilense</i>	–	✓	–	–	–	–
5	<i>Bradyrhizobium japonicum</i> UCM B–6018	✓	✓	✓	✓	–	Aminoácidos libres
7	<i>B. megaterium</i>	–	✓	–	–	–	–
8	<i>B. mucilaginosus</i>	–	✓	–	–	–	–
9	<i>B. edaphicus</i>	–	–	✓	–	–	Cítrico, oxálico, tartárico, succínico, glucónico
10	<i>Pseudomonas</i> strain GRP3	✓	–	–	✓	–	–
11	<i>Pseudomonas fluorescens</i> C7	✓	–	–	✓	–	–
12	<i>Klebsiella pneumonia</i> , <i>Pantoea agglomerans</i>	✓	–	–	–	–	–
13	<i>Azotobacter</i> spp	✓	–	–	–	–	–
14	<i>Azotobacter chroococcum</i>	✓	–	–	–	–	–
15	<i>Pseudomonas alcaligenes</i> PsA15	✓	–	–	–	–	–
16	<i>Mycobacterium phlei</i> MbP18	✓	–	–	–	–	–
17	<i>Azospirillum</i> spp.	✓	–	–	–	–	–
18	<i>Azospirillum lipoferum</i> , <i>Azospirillum brasilense</i>	✓	–	–	–	–	–
19	<i>Bacillus</i> spp, <i>Burkholderia</i> spp	–	✓	–	–	–	–
20	<i>Streptomyces</i> spp.	–	✓	–	–	–	–
21	<i>Achromobacter</i> spp.	–	✓	–	–	–	–
22	<i>Micrococcus</i> spp.	–	✓	–	–	–	–

23	<i>Azospirillum</i> spp.	-	✓	-	-	-	Glucónico
24	<i>Bacillus megaterium</i>	-	✓	-	-	-	-
25	<i>Pseudomonas alcaligenes</i>	-	✓	-	-	-	-
26	<i>P. natatu</i>	-	✓	-	-	✓	-
27	<i>S. guianensis</i>	-	✓	-	-	✓	-
28	<i>Bacillus mucilaginous</i>	✓	-	-	-	-	-
29	<i>B. megaterium</i>	✓	-	-	-	-	-
31	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Erwinia herbicola</i> , <i>Pseudomonas cepacia</i> , and <i>Burkholderia cepacia</i>	-	-	-	-	-	Glucónico
32	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	✓	✓	✓	✓	-	-

Hongos que solubilizan nutrientes y que pueden formar agregados y/o producen glomalina (FA/PG) y promueven la estabilidad de agregados (EA).

No.	HONGOS	N	P	K	OM	FA/PG	EA
1	<i>Rhizophagus irregularis</i>	-	-	-	✓	✓	✓
2	<i>Agaricus liliceps</i>	-	-	-	-	✓	✓
3	<i>Paraglomus occultum</i>	-	-	-	✓	✓	✓
4	<i>Glomus mosseae</i>	✓	✓	-	✓	✓	✓
5	<i>Laccaria bicolor</i> , <i>L. laccata</i> , <i>Lactarius theiogalus</i> , <i>Paxillus involutus</i> and <i>Suillus bovinus</i>	-	-	-	-	✓	✓
6	<i>R. intraradices</i> , <i>G. aggregatum</i> , <i>G. viscosum</i> , <i>Claroideoglomus etunicatum</i> , <i>C. claroideum</i>	✓	✓	✓	-	-	-
7	<i>G. mosseae</i> and <i>G. intraradices</i>	-	-	✓	-	-	-
8	<i>Aspergillus terreus</i> and <i>A. niger</i>	-	-	✓	-	-	-

Hongos y bacterias que realizan actividad sinérgica y/simbiótica para solubilizar nutrientes y que pueden formar agregados y/o producen glomalina (FA/PG) y promueven la estabilidad de agregados (EA).

No.	Microorganismo	N	P	K	OM	FA/PG	EA
	<i>Inoculante simple</i>						

1	i. <i>Bacillus megaterium</i> ,	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	ii. <i>Bacillus thuringiensis</i>						
	iii. <i>Ps Putida</i>						
2	i. <i>Bacillus megaterium</i>	✓	✓	✓	-	-	-
	ii. <i>Mocorriza hongo</i>						
3	i. <i>Bacillus megaterium</i> ,	✓	✓	✓	✓	✓	-
	ii. <i>Bacillus thuringiensis</i>						
	iii. <i>Enterobacters</i>						
4	i. <i>Rhizophagus irregularis</i>	-	-	-	-	✓	✓
	ii. <i>Microorganismos nativos del patrimonio suelo</i>						
5	i. <i>Piriformospora indica</i>	✓	✓	-	-	-	-
	ii <i>Pseudomonas R81</i>						
	Co-inoculante						
1	<i>Bacillus megaterium</i> + micorriza + composta	1	-3	2	-	-	-
2	<i>Azospirillum brasilense</i> + <i>pantoea dispersa</i> + residuo orgánico	13	-29	67	8	-	-
3	ii. <i>Ps Putida</i> + micorriza hongo (<i>Rhizophagus intraradices</i>)	-	12	248	-	-	-
4	<i>Bacillus megaterium</i> + micorriza	7	-42	16	-	-	-
5	<i>Azospirillum brasilense</i> + <i>pantoea dispersa</i>	8	133	84	1	-	-
6	<i>Rhizophagus irregularis</i> + microorganismos nativos del suelo	-	-	-	-	-	1
7	<i>Piriformospora indica</i> + <i>pseudomonas R81</i>	21	29	12	-	-	-
	Simple/co-inoculante+fertilizante orgánico						
1	<i>Bacillus megaterium</i> + micorriza + composta						
2	<i>Azospirillum brasilense</i> + <i>pantoea dispersa</i> + residuo orgánico						
3	i. <i>Bacillus megaterium</i> + residuo orgánico						
4	ii. <i>Bacillus thuringiensis</i> + residuo orgánico						
5	iii. <i>Enterobacters</i> + residuo orgánico						

Mantener el desarrollo de vegetación

Las plantas vivas a través de exudados de la raíz son la fuente de alimento disponible para el *BIOMA_{microbiano}* del suelo, que dan man-

tenimiento y soporte a la rizosfera, área con actividad microbiana concentrada; con ello, son la parte más activa del ecosistema del suelo (nutrientes disponibles en cantidad, oportunidad y calidad, ocurrencia de ciclos biogeoquímicos y aprovechamiento de agua). Los rizodepósitos son un gran costo, en términos de energía, para el agroecosistema; se estima que ocupan el 50% de la energía solar capturada por el proceso fotosintético de las plantas. Esta energía, que puede ser empleada para la producción de biomasa, se usa para activar los procesos del suelo, por ello; ante la alta degradación, la productividad es menor en términos de biomasa acumulada, pero los rizodepósitos son un gran triunfo para la sobrevivencia del agroecosistema. Aquí la recomendación es que el suelo cuente el mayor tiempo posible con una cubierta vegetal que aporte exudado, que promuevan las funciones biogeoquímicas y bioelectroquímicas. Por lo tanto, el crecimiento de las plantas a lo largo del año (cultivos de temporada larga o múltiples cultivos de corta temporada, rotaciones, cultivos de cobertura) ayuda en el proceso de manejo de un suelo sustentable y ciclado de los nutrientes que las plantas necesitan para crecer.

Mantenimiento la cubierta del suelo

La cubierta del suelo reduce la erosión, conserva la humedad, reduce la temperatura, intercepta las lluvias, suprime el crecimiento de malezas y proporciona hábitat para los organismos del suelo. La cobertura del suelo puede ser proporcionada por rotaciones, cultivos de cubierta, rastrojo o residuo durante los periodos de crecimiento de los cultivos, y residuos o mulching entre periodos de cultivo.

La agricultura de conservación es un término utilizado para describir un sistema o enfoque de la agricultura, promovido por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), que incorpora estrategias de manejo de la SS y se enfoca principalmente en los tres principios de (a) labranza reducida, (b) cobertura vegetal permanente y (c) rotaciones diversificadas de cultivos, para un medio más sostenible de producción de alimentos a nivel mundial. Esta prác-

tica también resulta importante para contar con un proceso continuo de mineralización de N_2 y CO_2 .

PRÁCTICAS DE MANEJO

La rotación de cultivos

Las rotaciones de cultivos proporcionan numerosos beneficios a la producción de cultivos y a la calidad del suelo, y sirven a múltiples funciones. Pueden ayudar a conservar, mantener o reponer los recursos del suelo, incluyendo MO, nitrógeno y otros insumos de la nutrición, y propiedades físicas y químicas. Las rotaciones de cultivos se han asociado con el aumento de la fertilidad del suelo, el aumento de la conservación del suelo y la estabilidad del agregado, la mejora del manejo del agua en el suelo y la reducción de la erosión. Las rotaciones de cultivos también se asocian con el aumento de la biomasa y actividad microbiana del suelo, y también pueden conducir a una mayor diversidad del *BIOMA*_{microbiano} debido a la presencia de diferentes tipos de especies de plantas y sus raíces activas en el suelo. Las rotaciones de cultivos que maximizan la diversidad y los diferentes tipos de sistemas de plantas y raíces (mezcla de leguminosas, cereales, solanáceas, cucurbitáceas, brassicas, etc.) pueden influir grandemente en las comunidades microbianas del suelo.

Cultivos de cobertura y abonos verdes

Un cultivo de cobertura se define como un manejo de cultivo principalmente para cubrir el suelo, con el fin de protegerlo de la erosión y las pérdidas de nutrientes entre los periodos de producción. Se han documentado los beneficios y usos de los cultivos de cobertura, como son: la reducción de la escorrentía del agua y la erosión del suelo, la adición de materia orgánica y la mejora de la estructura, y en la labranza reducida, la captura, asimilación y el reciclado del nitrógeno, la mayor productividad y el control de malezas. Los cultivos de cobertura aumentan además la diversidad de cosechas, y también puede haber

ventajas para incrementar la frontera y diversidad del agroecosistema mediante el uso de mezclas de cultivos de cobertura multi-especies en lugar de una única especie. Se ha demostrado que el uso de cultivos de cobertura herbáceas (leguminosas) o de centeno en los sistemas de producción de hortalizas aumenta el contenido de materia orgánica, la estabilidad del agregado (capacidad para resistir la desintegración), la porosidad y almacenamiento y disponibilidad de agua; reduce la densidad aparente del suelo y la resistencia a la penetración, y ayuda a suprimir las malezas. Se ha demostrado que la alta aplicación de residuos y los cultivos de cobertura de invierno son importantes para agregar CHO y retener el N disponible para las plantas, aumentar la eficiencia de los fertilizantes y mejorar las propiedades físicas del suelo. El uso de cultivos de cobertura de invierno y verano minimiza la erosión, se reduce la lixiviación de N y nutrientes solubles. Los cultivos de cobertura también usan agua del suelo, sin embargo, ello puede ser un problema cuando el agua es particularmente limitada.

El tejido verde fresco (cultivo de cubierta) se refiere específicamente a la incorporación de material vegetal fresco con el fin de enriquecer el suelo. Por lo tanto, los cultivos verdes se cultivan únicamente para ser incorporados al suelo como materia orgánica, con alta concentración de carbohidratos y nutrientes disponibles. El cultivo verde generalmente resulta en mayores insumos de MO que las rotaciones de cultivos tradicionales o cultivos de cobertura, produciendo mejoras en la fertilidad y estructura del suelo, así como cambios significativos en las características de la comunidad microbiana del suelo. Los abonos verdes se utilizan tradicionalmente por sus beneficios nutricionales y de fertilidad, en particular la adición de CHO (materia orgánica) y N al suelo. Los abonos verdes resultan en una mayor biomasa y actividad microbiana, pero también cambian las comunidades microbianas de maneras que son claramente diferentes de otros tipos de enmiendas de materia orgánica, como el estiércol de ganado, aves, etc.

Enmiendas orgánicas

La adición directa de MO al suelo a través de enmiendas orgánicas, tales como compost y abonos orgánicos sólidos y líquidos (biomoléculas-lixiviado), tiene usos prácticos y ventajas para mejorar la calidad del suelo, afectando muchos parámetros que indican la mejora de las propiedades biológicas, químicas y físicas. Las enmiendas orgánicas se han asociado con cambios en la aireación y descompactación del suelo, la estructura, el drenaje, la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y la ecología microbiana, lo que reduce la erosión y mejora la retención de agua y la biodiversidad del suelo. Las enmiendas de compost, en particular, han demostrado estar relacionadas con un aumento de la actividad, diversidad y biomasa microbiana, de tal manera que afecta la relaciones en *BIOMA*_{microbiano}, con alta tendencia a supresión de los microorganismos nocivos, promoviendo el desarrollo específico de *BIOMA*_{microbiano} que demanda la etapa y condiciones ambientales del desarrollo del agroecosistema. Se han utilizado aplicaciones de MO líquida a través de solución líquida de biomoléculas-lixiviado, para incrementar la materia orgánica, el suministro de CHO, el metabolismo y la respiración, la infiltración y otras propiedades que permiten la captura y almacenamiento de agua, así como disminuir la densidad aparente y aumentar la biomasa del *BIOMA*_{microbiano}. Ocurre también una gran mejora en la porosidad y en la disponibilidad de nutrientes, silicio, fósforo, potasio, hierro y zinc.

Labranza de conservación

La labranza extensiva aumenta la erosión, interrumpe los procesos biológicos, causa pérdida de agua y reduce la agregación del suelo, dando como resultado costras duras y de difícil penetración de gases y agua, reflejada por la compactación del suelo y pérdida de materia orgánica. La labranza de conservación es un sistema de cultivo que deja al menos el 30% de la superficie del suelo cubierta por residuos en los periodos entre las cosechas y la siembra. Como tal, la labranza de conservación abarca las operaciones de la labranza cero, en las cuales el suelo se deja

intacto, y las operaciones de mínima o reducida, en las cuales el número o la intensidad de las labores de labranza se reducen para mantener la cubierta con residuos.

Consideraciones de manejo del PS

La implementación de los conceptos y prácticas en la gestión de la SS en el manejo de agroecosistemas ha estado en marcha durante los últimos 20 años y seguirá siendo la dirección del futuro, ello es esencial para la producción sostenible de cultivos y el mantenimiento de la calidad ambiental, que demanda el crecimiento de la humanidad. La agricultura convencional ha recorrido un largo camino, con la adopción generalizada de la labranza de conservación y rotaciones de cultivos. Sin embargo, en otros aspectos, el progreso ha sido muy lento, con muchos rubros en la producción de cultivos aún atrasados en prácticas no sustentables del suelo y una reticencia a adoptar prácticas de manejo de la SS más agresivas, como cultivos de cobertura diversificados, abonos verdes y enmiendas orgánicas sólidas y líquidas. Por lo tanto, aún queda mucho por hacer para seguir moviendo la agricultura hacia una mayor SS y un futuro sostenible. Por nuestra parte, todavía hay mucho más que se necesita para determinar las interacciones complejas entre las prácticas y las propiedades del suelo y sus efectos y consecuencias finales, así como proporcionar respuestas claras sobre cómo implementar mejor la gestión adecuada de la SS, con prácticas para cada agroecosistema y obtener el máximo beneficio en la PPN.

En general, las prácticas de gestión que promueven la SS también mejorarán en general la supresión de plagas y enfermedades. Todas las prácticas importantes de construcción de la SS, como el uso de rotaciones de cultivos, cultivos de cobertura y abonos verdes, enmiendas orgánicas y labranza de conservación, contribuyen a la construcción de comunidades de *BIOMA*^{microbiano} diverso y activo para el desarrollo del proceso biogeoquímico y bioelectroquímico, que mejoren la resiliencia del agroecosistema al suprimir factores bióticos y abióticos. Se ha demostrado que todas estas prácticas reducen eficazmente la mayoría

de las principales enfermedades transmitidas por el suelo dentro de sus respectivos agroecosistemas. Sin embargo, algunos de estos cambios toman un tiempo considerable para desarrollarse y estabilizarse (son progresivas), por lo que algunas enfermedades, y diferentes problemas sanitarios pueden surgir durante las etapas de transición. Además, existe mucha variabilidad e incertidumbre asociada con los diferentes tipos y cualidades de los materiales utilizados, sus interacciones y combinación de propiedades de cada material, lo que hace que el grado de manejo de la enfermedad sea incierto. Se debe prestar mucha atención a la determinación de la combinación adecuada de prácticas que funcionan mejor para sistemas específicos. Incluso cuando las prácticas de manejo de la SS estén funcionando y progresando como deberían, la gestión de la enfermedad no estará completa y se necesitarán medidas adicionales de control. No se equivoquen, las prácticas de manejo de la SS proporcionan probablemente el mejor enfoque general para manejar la productividad progresiva del agroecosistema, e incluso algunas enfermedades foliares. Estas prácticas deben ser el núcleo de un buen programa de manejo para el incremento de la cantidad y calidad de las cosechas por unidad de superficie. Pero siempre habrá necesidad de medidas de control adicionales, así como la necesidad de responder rápidamente a una amenaza emergente a causa del cambio climático, para lo cual está la aplicación muy diversa de productos naturales, prácticas culturales adicionales o el control biológico, con el fin de proporcionar una gestión de la producción de alimentos que soporten el desarrollo sano de los agroecosistemas y de la humanidad, donde se cumplan los mínimos de bienestar de la salud.

EXUDADOS DE LA RAÍZ Y SU INTERACCIÓN EN EL AGROECOSISTEMA

Los exudados liberados por la raíz en el agroecosistema son equivalentes a 1.5 ton de carbono por hectárea. Esta cantidad es empleada por la planta para activar los procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos en el PS. Las sustancias que rizodepositan, son de gran diversidad y

función químico/biológica. De manera general estas se mencionan en la tabla siguiente:

Compuestos orgánicos y enzimas identificadas en exudados de la raíz del agroecosistema de la planta maíz y otras diferentes especies de plantas.

Aminoácidos	Ácidos orgánicos	Azúcares	Vitaminas	Purinas / Nucleósidos	Enzimas	Iones inorgánicos y moléculas gaseosas
α -Alanina	Cítrico	Glucosa	Biotina	Adenina	Fosfatasa Ácido/Alcalina	HCO_3^-
β -Alanina	Oxálico	Fructosa	Tiamina	Guanina	Invertasa	OH^-
Asparagina	Málico	Galactosa	Niacina	Citidina	Amilasa	H^+
Aspartato	Fumárico	Maltosa	Pantotenato	Uridina	Proteasa	$\text{H}_2\text{CO}_3/\text{CO}_2$
Cisteína	Succínico	Ribosa	Riboflavina		Peroxidasa	H_2
Cistina	Acético	Xilosa	Ascórbico		Catalasa	H_2O_2
Glutamato	Butírico	Ramnosa				O_2 soluble
Glicina	Valérico	Arabinosa				
Isoleucina	Glicérico	Rafinosa				
Leucina	Piscídico	Desoxirribosa				
Lisina	Fórmico	Oligosacáridos				
Metionina	Aconítico	Fucosa				
Serina	Láctico					
Treonina	Pirúvico					
Prolina	Glutárico					
Valina	Malónico					
Triptófano	Aldónico					
Omitina	Eritrónico					
Histidina	Tetrónico					
Arginina	Benzoico					
Homoserina	Butírico					
Fenilalanina	Cafeico					
γ -Aminobutírico	Ferúlico					
α -Aminoadípico	Vanílico					
Mugineico						

Algunas de estas moléculas se pueden formar de manera espontánea en la rizosfera, ante la presencia de donadores de electrones, CO_2 , oxí-

geno y agua. También en la rizosfera y en las biomoléculas-lixiviado se encuentran presentes moléculas de mayor estructura y peso molecular, como las que se enlistan en la tabla siguiente, indicando la posible actividad metabólica conocida de manera individual. En su conjunto pueden desempeñar un papel diferencial más completo y potencializado. Algunas de estas moléculas permiten la interacción planta-planta, planta-ambiente, planta-microorganismos, planta-insectos, etc.

Papel funcional de los componentes del exudado de la raíz en la rizosfera.

Componente	Función en la rizosfera
Fenólicos	Fuente de nutriente, señal quimioatrayente para microorganismos, promotor del crecimiento microbiano, inductores e inhibidores de genes <i>nod</i> en rizobios, inductores de resistencia contra fitoalexinas, quelatan nutrientes pobremente solubles, detoxificantes (Al), fitoalexinas contra patógenos del suelo, aceptor final de electrones en la cadena respiratoria, regulación del potencial óxido-reducción, xenobióticos.
Ácidos orgánicos	Fuente de nutrientes, señal quimioatrayente para microorganismos, disolución de minerales primarios del suelo e incrementar la concentración de nutrientes en la solución del suelo, quelatan nutrientes minerales poco solubles (Mn, Zn, Fe), acidificantes del suelo, detoxificantes (Al), inductores de genes <i>nod</i> .
Aminoácidos y fitosideróforos	Fuente de nutrientes, quelatan nutrientes minerales pobremente solubles, quimioatrayente de microorganismos.
Vitaminas	Promotores del crecimiento de la planta y de los microorganismos, fuente de nutrientes.
Purinas	Fuente de nutrientes.
Enzimas	Catálisis para la liberación de fósforo de moléculas orgánicas, biocatálisis para la transformación de la materia orgánica del suelo, catálisis de reguladores de la homeostasis de la raíz (H_2O_2 vs catalasa y peroxidasa).
Células de la epidermis y corteza (Rizoplaneo)	Produce señales que controlan la expresión del gene, liberan H_2O_2 para producir especies reactivas de oxígeno, estimulan el crecimiento bacteriano, liberan quimioatrayente, sintetizan moléculas de defensa para la rizosfera y para suprimir el ataque bacteriano e infecciones, liberan mucilago y proteínas.

Estas moléculas en la rizosfera son responsables de los procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos que ocurren en el PS del agroecosistema y que le permiten ser eficiente en PPN. Es importante considerar que las biomoléculas-lixiviado y exudados de la raíz y *BIOMA_{microbiano}*, son capaces de disolver la materia orgánica y los minerales primarios presentes en el suelo, promoviendo el incremento de la concentración de

sólidos disueltos, en la fase acuosa, estos elementos son el K, Mg, Ca, P, Fe, Zn, Cu, Si, Mn, O, C, Na, Cl, H. Las biomoléculas, las condiciones de clima, el *BIOMA*_{microbiano} y planta (raíz), finalmente son responsables del comportamiento, funciones físicas, químicas y biológicas del suelo.

Adicionalmente, la planta en su sistema radicular cuenta con procesos específicos para lograr la disponibilidad de nutrientes del suelo, aunque esta actividad presenta una gran demanda de energía equivalente al 50% de la energía capturada por el proceso fotosintético diario, limitando la disponibilidad para un crecimiento productivo. En la siguiente tabla, de una manera resumida, se muestran algunos de los mecanismos que la planta emplea para la disolución del PS y asimilación de nutrientes.

Mecanismos del agroecosistema para la disolución incongruente de minerales primarios del suelo.

Tipo de mecanismo	Mecanismo	Descripción y comentario
Inducción de acidificación quelación por la planta. Liberación de protones H ⁺ , COO ⁻ , H ₂ O ₂	Secreción de protones por la raíz	La secreción de protones por la raíz (e.g., CO ₂ , detritos y ácidos orgánicos) causa la acidificación de la rizosfera, acelerando las reacciones de disolución de los minerales del suelo
	Respiración de la raíz	La respiración de la raíz incrementa la concentración de CO ₂ (pCO ₂) en la solución del suelo, formado H ₂ CO ₃ /CO ₂ , que actúa disolviendo los minerales.
	Exudados radicales, ácidos orgánicos	Ácidos orgánicos (e.g., ácido cítrico, málico, y aminoácidos no proteicos) exudados por la raíz que causan acidificación de la rizosfera y quelatan cationes que reaccionan con nutrientes como P y Fe.
	Descomposición de la materia orgánica vegetal	La descomposición de la materia orgánica vegetal incrementa la concentración de moléculas ricas en carboxilos y nutrientes minerales
Quelatación inducida por microorganismos	Microorganismos (secretan sustancias y/o promueven por descomposición química y biológica de la materia orgánica) de sideróforos y carboxilos.	Ácidos orgánicos y sideróforos de bajo peso molecular producidos por microorganismos que viven en la rizosfera, que se quelatan con cationes, incrementan la disponibilidad y solubilidad de nutrientes para la rizosfera.

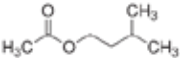
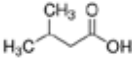
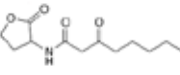
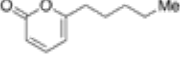
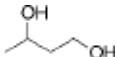
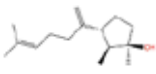
Tipo de mecanismo	Mecanismo	Descripción y comentario
Equilibrio del intercambio iónico	Asimilación de Si por la planta	Asimilación activa de Si por las plantas superiores en la forma de ácido ortosilícico H_4SiO_4 y su acumulación específica en tejidos en la forma de $SiO_2 \cdot nH_2O$ como fitolitos. Promueve la disolución incongruente de los minerales ricos en silicio del suelo.
Alteración de las propiedades físicas del suelo	Hidrodinámica y evapotranspiración	La circulación de humedad en la rizosfera mantiene a los minerales del suelo en contacto continuo con agua.
	Incremento de la superficie expuesta	La rizosfera incrementa el área de superficie expuesta de los minerales para incrementar la oportunidad de la disolución incongruente y la intemperización.
	Regulación de la temperatura del suelo	Las plantas afectan la temperatura del suelo (canopia y rizosfera).
Desarrollo del suelo	Formación de agregados del suelo	La erosión se reduce debido a la formación de agregados del suelo por los exudados de las raíces y las hifas de hongos como las micorrizas, lo que permite el desarrollo continuado del suelo en áreas de topografía moderada.

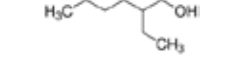
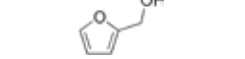
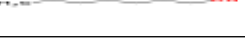
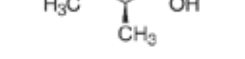
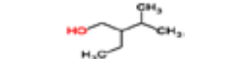
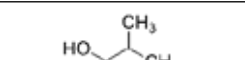
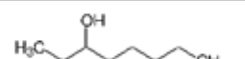
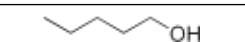
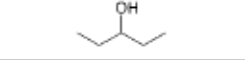
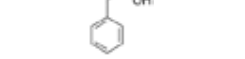
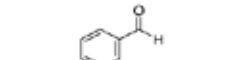
La cantidad total de compuestos orgánicos y enzimas que el agroecosistema de la planta de maíz exuda por su sistema radicular es equivalente a 166 kg C ha^{-1} en un sustrato estéril suplementado con nutrientes, mientras que en un suelo normal puede llegar a exudar $1.5 \text{ ton C ha}^{-1}$ por ciclo agrícola, el crecimiento de la raíz puede ser de 75 mm d^{-1} . La biomasa radicular varía según la disponibilidad de recursos en el sistema rizosfera y el estado REDOX de los MP del suelo.

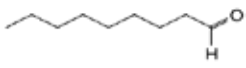
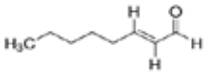
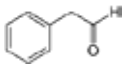
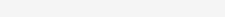
En la siguiente tabla se muestran las sustancias químicas que permiten la interacción entre la biota de la productividad primaria (microorganismo, hongo, planta). Estas moléculas pueden formar parte de los preparados orgánicos, si estos se elaboran con disciplina y apego a los protocolos de manejo, y se aplican de manera preventiva, a tiempo y se da un tiempo para que los procesos ocurran en condiciones del ambiente: Esto puede requerir de 60 a 100 días para activar el PS.

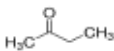
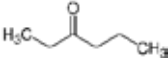
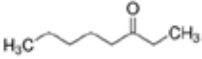
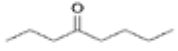
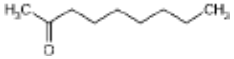
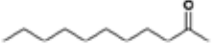
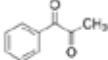
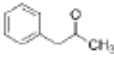
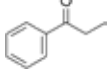
En la siguiente tabla se muestra el nombre y estructura de las sustancias químicas que permiten la interacción entre las plantas, bacterias y hongos dentro del agroecosistema. El signo en las columnas indica si la acción es positiva o negativa sobre los procesos de los organismos.

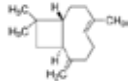
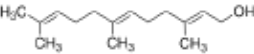
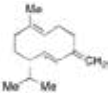
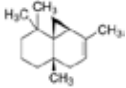
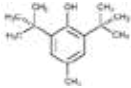
Interacción química entre las plantas, bacterias y hongos. Los compuestos tienen actividad sobre procesos metabólicos para la regulación de la interacción entre ellos. Pueden ser precursores y supresores de la actividad de los procesos metabólicos. Las estructuras químicas se ajustaron al espacio de la celda y tienen el propósito de mostrar la gran diversidad de las moléculas y lo simple o compleja de su composición. Se mantiene el nombre en inglés dado que es propio para mencionar a las moléculas químicas de manera universal.

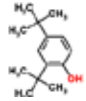
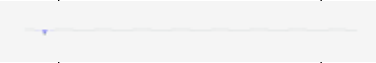
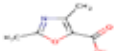
Substancias	Bacteria	Hongo	Planta	Estructura química
Ácidos				
acetic acid	+	+	+	
isoamyl acetate	+	+	+	
isovaleric acid	+	+	+	
N-acyl-homoserine lactones (AHLs)	+	+	+	
6-pentyl-pyrone	-	+	-	
Alcoholes				
butanediol	+	+	-	
chokol K	-	+	-	
m-cresol	+	+	+	
cyclohexanol	+	+	+	
decyl alcohol	+	+	+	

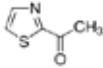
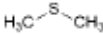
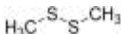
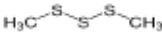
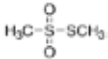
2-dodecanol	+	+	+	
2-ethyl-1-hexanol	+	+	+	
furfuryl alcohol	+	+	-	
1-hexanol	+	+	+	
1-heptanol	+	+	+	
2-methyl-1-butanol	+	+	+	
3-methyl-butanol	+	+	+	
2-methyl-1-propanol	+	+	+	
3-octanol	-	+	+	
1-octen-3-ol	+	+	+	
1-pentanol	+	+	+	
3-pentanol	+	+	+	
2-phenylethanol	+	+	+	
13-tetradecadien-1-ol	+	-	-	
Aldehidos				
benzaldehyde	+	+	+	

nonanal	+	+	+	
<i>trans</i> -2-octenal	+	+	+	
5-pentyl-2-furaldehyde	-	+	-	
phenyl-acetaldehyde	+	+	+	
tetradecanal	+	+	+	
undecanal	+	+	+	
Compuestos Alifáticos				
1-decene	+	+	+	
1-undecene	+	+	+	
1-dodecene	+	+	+	
ethylene	+	+	+	
2-methyl-n-1-tridecene	+	-	-	
nonane	+	+	+	
tridecane	+	+	+	
pentadecane	+	+	+	
Derivados Cetónicos				
acetoin	+	+	+	
acetophenone	+	+	+	

2-butanone	+	+	+	
2-pentylfuran	+	+	+	
3-hexanone	+	+	+	
3-octanone	+	+	+	
4-octanone	+	+	+	
2-nonanone	+	+	+	
decan-2-one	+	+	+	
2-undecanone	+	+	+	
2-undecanone	+	+	-	
1-methylthio-3-pentanone	+	-	+	
phenyl acetone	+	-	+	
1-phenyl-3-pentanone	-	+	+	
phenylpropanedione	+	-	+	
1-phenyl propane-1-one	+	-	-	
propiophenone	+	-	+	

6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone	+	-	+	
Terpenoides				
limonene	+	+	+	
δ-cadinene	+	+	+	
β-caryophyllene	+	+	+	
m-cymene	+	+	+	
β-elemene	+	+	+	
eucalyptol	+	+	+	
farnesol	+	+	+	
germacrene D	+	+	+	
(-)-thujopsene	-	+	+	
Compuestos Aromáticos				
butylated hydroxytoluene	+	4**	+	

2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol	+	+	+	
methyl benzoate	+	+	+	
Compuestos con N				
acetamide	+	-	+	
3-acetobutyl-3-hydroxyoxindole				
1-butanamine	+	-	+	
N,N dimethyl hexadecanamine	+	-		
2,4-dimethyl-oxazole	+	-	-	
2,5-dimethyl pyrazine	+	+	+	
indole	+	+	+	
methanamine	+	-	+	
4-nitroguaiacol	+	+	-	
nitropentane	+	-	+	
quinoline	+	+	+	
trimethylamine	+	+	+	

Compuestos con S				
2-acetyl thiazole	+	+	+	
benzothiazole	+	+	+	
DMS Dimethyl sulfide	+	+	+	
DMDS Dimethyl disulfide	+	+	+	
DMTS Dimethyl trisulfide	+	+	+	
methanethiol	+	+	+	
S-methyl-butanethioate	+	+	+	
S-methyl-methanethiosulfonate	+	+	+	

PRODUCCIÓN DE MO~LÍQUIDA: BIOMOLÉCULAS-LIXIVIADO ANTIOXIDANTE

Sistema para producir un líquido con alta concentración de biomoléculas-lixiviado orgánico, con actividad química y biológica para aprovechar de manera eficiente el patrimonio suelo e inducir la resistencia sistémica en cultivos agrícolas. Para lograr este propósito se requiere que el líquido de biomoléculas contenga una gran diversidad de sustancias con radical carboxilo [$\sim\text{COOH}$] con diferente peso molecular y químicamente reducidas, capaces de donar energía, con un pH alcalino superior a 7.5, una conductividad eléctrica mayor a 12,000 ppm y potencial REDOX de-300 mV, con rH menor que 10.

La adecuada producción y aplicación de biomoléculas permiten contar con una herramienta eficiente para la disolución de minerales primarios que aportan nutrientes a la solución del patrimonio suelo y ser aprovechados por los cultivos agrícolas durante el desarrollo del

ciclo agrícola. Ello ocurre en la capa arable de 40 cm. Asimismo, las biomoléculas se emplean para activar el desarrollo y multiplicación de la diversidad del bioma microbiano, promover la transformación y aprovechamiento de los esquilmos agrícolas, mediante materiales estables como el humus, que actúa como base para formar quelatos con cationes requeridos en la nutrición de la planta: nitrógeno (N), calcio (Ca), potasio (K), fósforo (P), magnesio (Mg), boro (B), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), etc. También, las biomoléculas se emplean como base para la reproducción del consorcio microbiano y al mismo tiempo para realizar la transformación de biomoléculas en productos con alta actividad biológica y realizar mejoras en el crecimiento de los cultivos agrícolas. Otra aplicación de las biomoléculas es contribuir con la nutrición de los cultivos vía foliar.

Se recomienda distribuir las aplicaciones biomoléculas de la siguiente manera: 60 litros antes de la siembra, 50 litros a la siembra y 190 litros distribuidos cada 20 días a través de riego. Se recomienda realizar análisis de las biomoléculas-lixiviado por la técnica EDS-XRF, ello con la finalidad de conocer los aportes minerales para la nutrición. Se recomienda que con regularidad se cuantifique el pH, el potencial de óxido-reducción (ORP) y la conductividad eléctrica.

Insumos

- a. Esquilmos agrícolas, pre digeridos, estiércol “maduro” y seco vacuno de tres a seis meses de edad (1 m³, aproximadamente 800 kg).
- b. Tela porosa tergalina de 2.77 metros de ancho (10 metros).
- c. Contenedor de plástico de 1,000 litros con jaula metálica y pallet plástico, (dos unidades).
- d. Bomba sumergible (una bomba 1 HP).
- e. Activador mineral de ciclos biogeoquímicos, BioGeo® (100 kg).
- f. Ácido acetilsalicílico y/o ácido salicílico (100 g).
- g. Cedazo de plástico para remover y cribar los sólidos.
- h. Conexiones, válvulas y aspersores de plástico polietileno y/o de PVC.

Procedimiento

Primero, colocar el recipiente de 1,000 litros que está abierto en la parte superior, sobre el recipiente cerrado. El recipiente abierto servirá para llenarlo con estiércol, mineral BioGeo® y agua, para que se produzcan biomoléculas a través de procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos. El recipiente cerrado servirá para almacenar las biomoléculas que se producen.



El estiércol-materia orgánica reacciona con el mineral BioGeo[®], en presencia de agua y aire (O₂), creando el proceso BBB (Biomoléculas, Biogeoquímica, Bioelectroquímica), como se muestra en la reacción anterior.

El esquilmo agrícola, tipo estiércol, se coloca en capas de 15 cm, sobre las cuales se espolvorea una pequeña capa de activador mineral BioGeo[®], después se agrega agua sólo para humedecer. Después se coloca otra capa de estiércol y activador mineral. (Se recomienda intercalar capas de tela tergalina, para fácil remoción de la materia orgánica residual que se obtiene al final de proceso.) Así se continúa adicionando capas hasta llenar el tanque de 1,000 litros. Una vez lleno se aplica agua hasta saturar el estiércol y se deja reposar por 5 horas. Después, las biomoléculas se pasan al recipiente inferior y se vacía el recipiente, luego el líquido oscuro con las biomoléculas otra vez se pasa al recipiente con estiércol. La recirculación de biomoléculas se realiza por 30 días, tiempo en el cual ocurre el proceso biogeoquímico y bioelectroquímico que se requiere para que las biomoléculas activen el mejor aprovechamiento del patrimonio suelo, y lograr mejorar la cosecha y sanidad del cultivo.

Después de obtener los primeros 1,000 litros de biomoléculas, nuevamente se adicionan aproximadamente 1,000 litros de agua, para obtener otros 1,000 litros de biomoléculas. Se recomienda realizar este proceso 3 veces por cada 800 kilos de estiércol y 100 kilos de mineral BioGeo[®], es decir que se pueden obtener, por cada metro cúbico de estiércol, 3,000 litros de biomoléculas.

Se recomienda aplicar al patrimonio suelo 300 litros de biomoléculas por hectárea en un ciclo agrícola de 6 meses. Las biomoléculas se pueden aplicar al campo concentradas o en dilución con agua; asimismo, se pueden almacenar en lugar fresco por más de 6 meses.

Programa ideal para activar el aprovechamiento del patrimonio suelo:

- 100 litros 2 meses antes de siembra.
- 60 litros a la siembra.
- 40 litros al primer riego.
- 100 litros al segundo riego.



Composición química típica de biomoléculas-lixiviado, producido a base de materia orgánica de vacuno y activador mineral.

Elementos mg l ⁻¹		Muestra A		Muestra B	
		mM l ⁻¹	mg l ⁻¹	mM l ⁻¹	
Carbón	C	19,277.18	1,604.96	31,742.57	2,642.79
Oxígeno	O	17,258.10	1,078.67	25,537.00	1,596.12
Hidrógeno	H	1,677.11	1,663.90	2,761.60	2,739.85
Sodio	Na			51.25	2.23
Magnesio	Mg	165.37	6.80	167.40	6.89
Aluminio	Al	176.88	6.56	8.65	0.32
Silicio	Si	451.03	16.06	106.67	3.80

Fósforo	P	114.13	3.68	411.97	13.30
Azúfre	S	247.40	7.72	6,582.87	205.30
Cloro	Cl	725.90	20.47	2,972.47	83.84
Potasio	K	6,601.17	168.84	3,244.77	82.99
Calcio	Ca	1,177.07	29.37	4,025.13	100.43
Manganeso	Mn	53.15	0.97	97.20	1.77
Hierro	Fe	197.27	3.53	115.93	2.08
Cobre	Cu	13.00	0.20	20.40	0.32
Zinc	Zn	28.90	0.44		
Bromo	Br			54.87	0.69
Níquel	Ni	38.00	0.65	37.20	0.63
Rubidio	Rb	40.43	0.47		
Estroncio	Sr			26.00	0.30
Rutenio	Ru			62.30	0.62
pH		8.41		8.25	
ORP	mV	7.70		5.90	
rH		23.74		23.36	
EC	mS cm ⁻¹	9,895.00		23,240.00	
EC Abs.	mS cm ⁻¹	9,192.00		21,560.00	
TDS	ppm	4,948.00		11,620.00	
SD	ppm	6,332.80		14,873.60	
M.O.	%	1.12		1.84	
O/C	relación	0.90		0.80	
Energía metabólica	Kcal m ⁻³	28,675.42		47,218.10	
Energía metabólica	MJ m ⁻³	119.98		197.56	

Beneficios de las biomoléculas aplicadas para el aprovechamiento del patrimonio suelo

1. Las biomoléculas-lixiviado se producen y transforman por un proceso bio-geoquímico y bioelectroquímico, con la ocurrencia de mínima fermentación.
2. Las biomoléculas actúan disolviendo los nutrientes presentes en el patrimonio suelo; esto significa que se aprovechan 1,000 kilos de minerales de las 4,000 ton ha⁻¹, presentes en la capa arable del suelo, a 40 cm de profundidad. Los elementos que se solubilizan en el suelo son silicio, fósforo, hierro, zinc, calcio, magnesio, potasio, nitrógeno, y demás microelementos presentes en él.

3. Se incrementa el contenido de materia orgánica rica en carboxilos, carbohidratos, fenoles y flavonoides, los cuales son precursores de nutrientes orgánicos y fuente de energía para el desarrollo de la rizosfera.
4. La solución de biomoléculas es rica en sustancias que nutren el desarrollo de la planta, como aminoácidos, azúcares, precursores de hormonas y otras moléculas con actividad biológica que activan procesos metabólicos y suprimen el desarrollo de plagas y enfermedades.
5. Las biomoléculas contienen nutrientes minerales, en una concentración de 20 a 30 gramos por litro.
6. Se induce el desarrollo de la biota microbiana benéfica nativa del suelo y la colonización de la rizosfera por biota microbiana inducida.
7. Las moléculas orgánicas son precursoras para la formación de metabolitos secundarios que la planta emplea para su adaptación biótica y abiótica, así también promueven la formación de moléculas con actividad biológica para la supresión del desarrollo de plagas de insectos y enfermedades, de tal forma que en la rizosfera se crea una bio-fábrica, proveedora de nutrientes y metabolitos secundarios.
8. Hacen que el suelo sea un medio adecuado para el desarrollo de las plantas, al crear condiciones bioelectroquímicas que proporcionan mayor disponibilidad de energía.
9. Suprimen la contaminación al transformar y dar valor agregado a los desechos orgánicos (estiércol) de ganado vacuno.
10. Se promueve la descompactación del suelo y la formación de agregados.
11. Se incrementa la captura de agua de lluvia y riego, de tal manera que el suelo puede almacenar y hacer disponible este importante líquido por un periodo más largo de tiempo.
12. Es una manera efectiva de activar los procesos biogeoquímicos del suelo, relacionados con la productividad de las cosechas.
13. Proporciona una forma de dosificar oxígeno disuelto, y promover un mejor desarrollo de la rizosfera.
14. Induce la captura, almacenamiento y mineralización del carbón en el suelo.
15. No es contaminante.
16. Su proceso de producción es relativamente simple.

A manera de resumen se presentan los resultados de la aplicación de biomoléculas sobre el patrimonio suelo.

Impacto sobre la actividad del suelo, de las biomoléculas-
lixiviado-antioxidante-vacuna.

Parámetro del suelo	Acción o efecto
Estabilidad de agregados del suelo	Incremento
Densidad aparente	Disolución de partículas grandes, mayores de 2 mm
Capacidad de almacenamiento de agua	Incremento
Factores químicos	
Metales pesados (Cd, Cr, Ni, Pb, etc.)	Supresión
Micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn, etc.)	Incremento
Macronutrientes (N, P, Si, Mg, K, Ca, S)	Incremento
pH	Estable 7.0 a 7.5
Conductividad eléctrica	Incremento
Potencial óxido-reducción	El suelo oxidado, sin energía, pasa a reducido con energía
Carbón orgánico	Incremento
Ácidos húmicos	Incremento
Biológico	
Biotoma microbiano de la rizosfera	Incremento
Actividades enzimáticas	
i. Deshidrogenasa	Incremento
ii. Fosfatasa	Incremento
iii. Glucosidasa	Incremento
iv. Actividad ureasa	Incremento
Población microbiana (bacterias aeróbicas y población de hongos)	Incremento
Actividad de la biota microbiana	
i. Respiración del suelo y liberación de CO ₂	Incremento
ii. Disolución de minerales del suelo y degradación de materia orgánica	Incremento

El ProRedox es un nombre para describir a un lixiviado líquido obtenido a partir de materia vegetal que se degrada por el proceso digestivo como el de ganado vacuno, por una gran diversidad de biota microbiana que forma parte de su sistema digestivo, que habita principalmente en el rumen y se complementa con jugo gástrico. Una vez que el proceso de digestión extrae las demandas de la dieta del ganado, los restos se expulsan como un desecho, con más de un 50% de material vegetal biodegradado, que es rico en desechos microbianos, enzimáticos y polímeros y moléculas de carbohidratos y sustancias de origen fenólico derivadas de ligninas con bajo peso molecular. Los desechos orgánicos son una gran fuente de grupos químicos funcionales, a partir de los cuales el *BIOMA_{microbiano}* del suelo puede construir moléculas simples y complejas que pueden soportar el desarrollo de la rizosfera vegetal. En la siguiente tabla se muestran algunos de los principales grupos químicos orgánicos funcionales.

Principales grupos funcionales que pueden formar parte de moléculas orgánicas con función biológica.

Función	Nom. grupo	Grupo
Ácido carboxílico	carboxilo	R-COOH
Éster	éster	R-COOR'
Amida	amido	R-CONR'R
Nitrilo	nitrilo	R-C [≡] N
Aldehído	carbonilo	R-CH=O
Cetona	carbonilo	R-CO-R'
Alcohol	hidroxilo	R-OH
Fenol	fenol	-C ₆ H ₅ OH
Amina		
Primaria	Amino	R-NH ₂
Secundaria	"	R-NHR'
Terciaria	"	R-NR'R''
Éter	Oxi	R-O-R'
Hidr. etilénico	alqueno	C=C

Hidr. acetilénico	alquino	$C\equiv C$
Nitrocompuesto	Nitro	$R-NO_2$
Haluro	halógeno	$R-X$
Radical	alquilo	$R-$

R- puede ser cualquier estructura como CH_3- , CH_3CH_2- , etc.

Con estos grupos se construyen las biomoléculas (CHO), por lo que existe un número muy grande de estructuras moleculares, muchas de las cuales no conocemos, pero en los sistemas biológicos están actuando.

Como las moléculas que se encuentran presentes en los desechos tienen un alto contenido de energía, es importante no degradarlas por procesos de fermentación, ya que esto las destruye, teniendo como resultado la liberación de energía en forma de calor, agua y bióxido de carbono (CO_2). Para evitar la degradación, se adiciona el activador mineral primario rico en elementos minerales en estado reducido (e.g. Fe^0 , Zn^0 , S^0 , Cu^0) que se conoce comercialmente como Biogeo®, en una proporción de 100 kilos por cada metro cúbico de materia orgánica de vacuno.

La adición de Biogeo® promueve una serie de procesos biogeoquímicos en los cuales la energía se almacena en la molécula orgánica, enriqueciéndola con hidrógeno (H), radical que es posible cuantificar a través de potencial de óxido-reducción, el cual se expresa en voltios y presenta valores negativos, que indican la riqueza de H^+ con energía disponible (la presencia de hidrógenos no indica riqueza de energía, como sería una medida de pH, que a valores bajos indica mayor concentración de H^+ , pero no necesariamente ellos tienen energía, y por el contrario pueden requerirla).

El proceso biogeoquímico de la producción de biomoléculas-lixiviado requiere de la presencia de oxígeno (O_2) como aceptor final de energía mediada por electrones, por ello es importante recircular las biomoléculas-lixiviado. Asimismo, es un proceso lento, no violento, por lo que el líquido debe tener contacto a intervalos regulares: reacción biogeo-

química-lavado (lixiviado)-oxigenación, dando lugar a la formación y crecimiento de moléculas de forma espontánea, siempre y cuando existan donadores de electrones como son los minerales primarios, que actúan como catalizadores.

Muchas de las moléculas que se forman son iguales a las que libera en la rizosfera la raíz del agroecosistema.

Las biomoléculas de exudados de la raíz y los aportes del *BIOMA*^{microbiano} en el agroecosistema del maíz participan en la asimilación de nutrientes que demanda durante su ciclo anual. En la tabla siguiente se muestra una asimilación típica de nutrientes. Note que en términos de moles (cantidad de átomos de cada elemento), el hidrógeno es el principal elemento que se acumula en la biomasa total de la planta e indica la importante función de este elemento. Se mantiene una relación aproximada de $1 = (C+O)/H$.

Composición mineral elemental de maíz para ensilar en base peso seco (PS) y el total extraído por 50 ton ha⁻¹. Troeh, Frederick and L. M. Thompson. 2005. *Soils and soil fertility*. Oxford University Press. New York. Modificado por Quero E.

Elemento		mg kg ⁻¹ PS	% PS	mM kg ⁻¹	kg ha ⁻¹
Oxígeno	O	450,000	45.0000	28,126.055	22,500.00
Carbón	C	440,000	44.0000	36,634.001	22,000.00
Hidrógeno	H	63,000	6.3000	62,506.201	3,150.00
Nitrógeno	N	13,000	1.3000	928.127	650.00
Silicio	Si	12,000	1.2000	427.267	600.00
Potasio	K	9,000	0.9000	230.189	450.00
Calcio	Ca	2,500	0.2500	62.378	125.00
Fósforo	P	1,600	0.1600	51.657	80.00
Magnesio	Mg	1,600	0.1600	65.830	80.00
Azufre	S	1,500	0.1500	46.780	75.00
Cloro	Cl	1,500	0.1500	42.310	75.00
Aluminio	Al	1,100	0.1100	40.769	55.00
Sodio	Na	300	0.0300	13.049	15.00

Hierro	Fe	90	0.0090	1.612	4.50
Manganeso	Mn	60	0.0060	1.092	3.00
Zinc	Zn	30	0.0030	0.459	1.50
Boro	B	10	0.0010	0.925	0.50
Cobre	Cu	5	0.0005	0.079	0.25
Molibdeno	Mo	1	0.0001	0.010	0.05

NAN-O-FERT® BIOMA MICROBIANO VEGETAL PARA EL DESARROLLO PROGRESIVO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS



NAN-O-FERT® es un consorcio de 8 especies de microorganismos que habitan y hacen sinergia con los tejidos de las plantas. Ellos habitan el suelo principalmente a una profundidad de 5 a 10 cm y forman una biodiversa y dinámica relación progresiva con las raíces de las plantas, constituyendo un biosistema llamado rizosfera, compuesto por más 95 millones de individuos por gramo de suelo (1.2 mg carbono g⁻¹ de suelo), que miden de 1 a 5 micras. De estos, la mayor composición es de bacterias (94%), actinomicetos (4.8%) y hongos (0.5 %) que pueden aportar gran diversidad de genes activos para estimular el crecimiento vegetal y la capacidad de adaptación ante la ocurrencia de factores bióticos y abióticos.

NAN-O-FERT® es un bioma que sus especies microbianas pueden desarrollarse en armonía con las células y tejidos vegetales, tanto raíz (rizosfera) como en las hojas (filosfera). En ambos casos participan de manera complementaria en el metabolismo primario y secundario, e incrementan la efectividad en la acción de protección biótica y abiótica y el metabolismo REDOX (flujo de energía).

NAN-O-FERT® se aplica al suelo en una dosis de 60 litros por hectárea por ciclo agrícola, 20 litros antes de la siembra, 10 litros después de siembra como un repuesto, y para mantener la biodiversidad se aplican 30 litros sobre todo en los primeros 60 días de desarrollo. Las aplicaciones se pueden realizar en combinación con materia orgánica líquida y nutrientes.

NAN-O-FERT® se aplica en el recubrimiento de semillas para lograr una mejor expresión genética y de las reservas minerales y carbohidratos en la semilla. En bioma desde esta etapa también protegerá a las hojas, tallos, flores y frutos.

NAN-O-FERT® es un producto de la tecnología apropiada, por lo que, manteniendo las condiciones y servicios adecuados, es posible replicarlo.

NAN-O-FERT® no es tóxico para los humanos y animales, pero debe emplearse con precaución y de tener contacto, lavarse y mantener el producto en un ambiente higiénico.

COMPONENTES DEL BIOMA MICROBIANO NAN-O-FERT®

Los microorganismos de NAN-O-FERT® están concentrados para su reproducción garantizando una capacidad formadora de colonias (UFC de 10^5 a 10^9 por mililitro de solución).

1. ***Azospirillum brasilense***: Fijadora de nitrógeno y promotora del crecimiento.
2. ***Beauveria bassiana***: Entomopatógeno capaz de parasitar insectos, insecticida biológico.
3. ***Bacillus subtilis***: Libera sustancias con actividad fungicida.
4. ***Bacillus thuringiensis***: Libera sustancias con actividad de insecticida y promotora del crecimiento.
5. ***Metarhizium anisopliae***: Entomopatógenos capaz de parasitar insectos.
6. ***ectomicorizas/endomicorizas***: Asimilación y movilización de fósforo, promoción del crecimiento y mejora del rendimiento de cosecha.
7. ***Paecilomyces lilacinus***. Enemigo natural de muchos géneros de nematodos y algunos insectos como mosca blanca y chinche.
8. ***Trichoderma harzianum***: Control y supresión de patógenos, capaz de liberar sustancias antagonicas.
9. **Consortio de 60 microorganismos que amplían y fortalecen el metabolismo primario y secundario (biodiversidad genética), MEPS**: Bacterias acidolácticas, proteobacterias α , β y γ , levaduras, microorganismos fotoautotróficos).
10. ***Sacharomices sp.*** Levadura promotora del metabolismo secundario.
11. **Consortio de microorganismos biogeo-bioelectroquímico**. Microorganismos con alta capacidad de liberar enzimas (catalizadores) para la hidrólisis de carbohidratos, proteínas, celulasa, lignina, y promover reacciones REDOX para el flujo de energía (electrones).

MULTIPLICACIÓN DE BIOMA MICROBIANO NAN-O-FERT®

Para activar la productividad del suelo, restaurando y activando procesos biogeoquímicos y bioelectroquímicos, es indispensable contar con una amplia biodiversidad del bioma microbiano del suelo, por lo que se recomienda aplicar al suelo de 60 a 100 litros por hectárea de bioma microbiano Nan-O-Fert®, el cual se puede multiplicar de la siguiente manera.

Para la reproducción se requiere:

Recipiente de plástico de 1,000 litros o bien contar con biofermentadores de acero inoxidable.



Para la multiplicación de bioma microbiana del suelo, Nan-O-Fert®, se requiere:

1. 100 litros de Bioma Nan-O-Fert®, compuesto por más de 8 especies de microorganismos (bacterias, bacilos, levaduras, hongos).
2. 20 litro de melaza (previamente calentada al sol).
3. 5 kg leche en polvo (sin antibióticos).
4. 5 litros de activador metabólico rico en fósforo, magnesio, calcio, potasio, zinc, hierro.
5. 900 litros de agua.

6. Recircular el líquido dos veces al día durante 30 minutos. A mayor frecuencia de recirculación, se obtendrá mayor multiplicación del bioma, evitando formar nata de grandes colonias.
7. La óptima multiplicación del bioma microbiano se logra con 120 horas de cultivo.
8. Mantenimiento del bioma microbiano; se logra adicionando a 500 litros y leche en polvo y melaza (5 kilos de cada uno), y cada 15 días adicionar un litro de activador metabólico.

Los insumos 2, 3 y 4 se disuelven previamente en agua, 5 y 6 se pueden mezclar y colocar en un saco de tela tipo tergalina y dejar colgando dentro del tanque, siempre en contacto con el bioma microbiano Nan-O-Fert®.

El doctor Edgar Quero Gutiérrez (1952-2020) fue un pionero en la revolución agroecológica de México, un científico mexicano comprometido con el desarrollo de una ciencia de frontera. Su trabajo transformó la agricultura al desafiar el paradigma de la revolución verde y promover un enfoque sustentable y autosuficiente. Quero abogó por una ciencia transdisciplinaria que integrara diversas disciplinas para entender mejor los sistemas de producción agroalimentarios.

Uno de sus legados más importantes fue la comprensión de la agricultura como un proceso que cosecha energía solar y preserva el suelo. Destacó la importancia del silicio en las plantas, lo que mejora la captación de luz solar y la defensa contra insectos, y promovió el manejo del potencial óxido-reducción (ORP) de los suelos para optimizar la eficiencia metabólica de los cultivos.

Fue un científico multifacético y un “científico de huarache”, como diría el maestro Efraín Hernández Xolocotzi, un científico con conciencia, ética y compromiso social. Fue un educador apasionado, comprometido con la formación de campesinos y técnicos, siempre promoviendo la ciencia práctica y accesible.

Su legado es fundamental para la transición agroecológica y la soberanía alimentaria en México, demostrando que es posible una agricultura sin agroquímicos ni transgénicos, centrada en la vida y el bienestar de las generaciones presentes y futuras. El trabajo del doctor Quero sigue siendo una guía para avanzar hacia una agricultura más justa y sostenible.