

Disertación del Académico Correspondiente Dr. Gustavo A. Orioli

Absorción de micronutrientes y los compuestos orgánicos.

Sr. Secretario de la Universidad
Sr. Presidente de la Academia
Señoras y Señores:

Vaya antes que nada mi profundo agradecimiento por la designación de Académico Correspondiente de esta prestigiosa Institución y por la presencia de tantos amigos y familiares que me infunden confianza en este acto tan especial para mi.

Procuraré por todos los medios no defraudar la confianza depositada. A todos muchas gracias.

La teoría del Big-Ban que es la más aceptada dice que vivimos en un Universo en plena expansión. Vamos a considerar un sistema abierto, el nuestro, que se ubica en una infinitésima porción de ese universo. Ese sistema como todo sistema abierto tiene un principio y un fin.

El principio es la energía radiante que continuamente está emitiendo una de las estrellas del universo: en este caso la estrella que conocemos con el nombre de SOL. De toda la energía que el sol está continuamente emitido solo una porción muy pequeña es interceptada por el planeta tierra, algo así como 2 cal por cm² y por min. A su vez solo una parte de esa energía radiante, la visible entre 400 y 700 nanometros, es convertida por las plantas verdes de energía física en energía química. Para ello aprovechan su aparato fotosintético y la presencia en el medio de CO₂ y H₂O, produciendo glucosa y liberando a su vez O₂. A su debido tiempo esa energía fijada por los vegetales en forma química más el O₂ de medio, son a su vez utilizados por los animales para su

desarrollo disipando parte de esa energía como calor y volviendo a generar CO₂ y H₂O. Lo que ocurre es que ni las plantas ni los animales son 100% eficientes por lo tanto parte de la energía original se disipa como calor ya que sale del cielo.

Es decir que se establece en algún punto del flujo de energía un ciclo donde materia y energía dan vuelta a su alrededor. Este ciclo implica que si bien la energía sigue moviéndose lo hace en un círculo, como ese círculo está en un pequeñísima parte del universo es como si la energía se hubiera detenido en el tiempo. Al menos por un cierto tiempo. Mientras tanto el calor desprendido y el resto de la energía radiante al no tener utilidad como energía aprovechable pasa al final del sistema abierto, final que está en algún punto del universo en expansión del que formamos parte.

Las leyes que reglan ese movimiento de energía desde un origen son conocidas, y especifican que la fuerza impulsora es un gradiente donde el final es el máximo de entropía o desorden.

Ese máximo de entropía o desorden se puede asimilar con la idea de la imposibilidad de existencia de vida. Dicho en otras palabras el concepto de vida está íntimamente ligado a la idea de orden, de información correctamente interpretada o leída.

En efecto, como ya dijimos, en algún punto de este sistema abierto parte

de esa energía es usada y conservada no solo como energía aprovechable sino también como orden. Usando información contenida en un microcuerpo autótrofo, el cloroplasto, en energía, el CO₂, el H₂O y el N₂ son convertidos en energía química como compuestos complejos y muchos más ordenados que los compuestos de origen. Parte de la energía usada en esa síntesis es usada para generar orden. Así por ejemplo cuando la glucosa es degradada hay una diferencia de energía que no se puede aprovechar y pasa a engrosar la entropía del sistema y por ende a aumentar el desorden del sistema. De un sistema más ordenado "una molécula de glucosa compleja" a un sistema más desordenado "moléculas de CO₂ y H₂O menos complejas".

Es decir por lo tanto que en el ciclo que describimos, a medida que los compuestos complejos y ordenados se usan y degradan a otros compuestos menos ordenados y menos complejos, se pierde energía no solo como calor sino también de información la que va a aumentar la entropía y el desorden.

Puede decirse entonces que parte de lo que se ha perdido es el resultado de esa información, destacando que el costo energético de esa información no es alto, mas bien barato. Esto está de acuerdo con lo que conocemos de todos los días en que la adquisición y transmisión de información se realiza con un muy bajo gasto de energía.

Otro atributo que quiero considerar en relación al orden y a la complejidad es la aparición de superficies y los fenómenos relacionados con ella. Las grandes superficies que crea y aprovecha el mundo orgánico, tiene fundamentalmente dos propósitos: uno el de servir de matriz para posibilitar la organización de la información y la segunda para separar compartimientos. Así el compartimiento donde está la

vida es operativo siempre y cuando esté separado del medio externo. En el comportamiento interno se disminuye la entropía y de hecho ese compartimiento no está en equilibrio con el medio externo. En el momento en que se establece el equilibrio entre en medio externo y el interno desaparece la vida. En cuanto a la relación entre superficies y lectura de la Información, esta lectura no sería organizada de no haber una matriz en la cual se ordenaran secuencialmente los datos. La lectura ordenada del mensaje asegura que la sucesión de datos se interprete como una frase donde las palabras están dispuestas de manera tal que tiene un significado lógico. Un paso metabólico no podría ocurrir de no estar las enzimas que catalizan las distintas reacciones ordenadas de un cierto modo.

Lo cierto es que el uso de la energía radiante para ser transformada en orden ha producido una terrible transformación en el sistema que estamos considerando. En efecto se ha detenido por un cierto tiempo y en un determinado lugar parte de esa energía que fluye continuamente a través del sistema. Con esa energía y usando información se crea orden. Eso, por lo que sabemos hasta ahora, ocurre solamente en la tierra y la consecuencia son las manifestaciones de vida. Aumento de orden, aumento de complejidad debido al adecuado uso de información que permite usar elementos o compuestos simples.

Si bien no se puede enunciar una regla absoluta, hay una tendencia que indicaría que en general cuanto mas complejo y ordenado sea un sistema hay más chances de que el tiempo en que la entropía se reduce sea más largo. Lo que dicho de otra manera el tiempo de sabrevida en más largo. OJO!!

Si se acepta esa hipótesis de trabajo luego se debería aceptar la idea de

que en el sistema se han ido generando subsistemas de soporte a la vida, formados a su vez por partes orgánicas animadas e inanimadas.

En el sistema suelo planta hay múltiples ejemplos de subsistemas y vamos a referirnos a dos de ellos: los ácidos orgánicos simples de bajo peso molecular componentes del llamado ciclo de Krebs y los ácidos húmicos que son de mayor peso molecular y alta complejidad que los anteriores. Ambos son productos de la biosíntesis llevada a cabo por organismos vivos, organismos que poseen la información necesaria para producirlos usando energía química y catalizadores enzimáticos. Ambos compuestos, los ácidos orgánicos y los ácidos húmicos, están separados inicialmente unos de otros por una interfase con una gran superficie a través de la cual algunos productos pueden pasar más fácilmente que otros.

En esa interfase se coloca la membrana que separa el interior de la célula del medio externo. Esa membrana, que tiene una organización y un orden rayano en lo perfecto, permite que en el interior de la célula se cree, con gasto de energía, un medio apto para la vida y que es diferente del medio externo. Como las células son tan pequeñas la relación entre la superficie de la membrana que las rodea y su volumen es muy grande, esta alta relación posibilita un eficientísimo intercambio tanto de energía como de productos desde el interior al exterior y viceversa. Esta relación se mantiene también en las organelas y microcuerpos de las células, por lo que la superficie disponible tanto para intercambio como para servir de matriz, es enorme.

Como dije más arriba, voy a tomar como ejemplo uno de los ácidos del ciclo de Krebs, que está localizado en

un microcuerpo de la célula llamado mitocondria. Este ácido, el cítrico, tiene tres propiedades que me interesa destacar: una, que puede pasar a través de las membranas tanto de las que rodean el mitocondrio como de la que rodea la célula; la segunda propiedad es que sirve de sustrato para la síntesis de moléculas más complejas y la tercera es que posee características que le permiten formar complejos con cationes metálicos. Lo interesante es que muchos de esos cationes metálicos son micronutrientes: Fe, Cu, Zn, etc. Al formarse ese complejo el metal queda "atrapado", algo así como sustraído del medio y por lo tanto no está sujeto a las reacciones que en él producen. Esto como vamos a ver luego es muy importante para asegurar las disponibilidades de los micronutrientes para las plantas.

Vamos a desarrollar un poco el sistema.

La utilización de los ácidos del ciclo de Krebs, que además de producir poder reductor sirven de sustrato para la síntesis de compuestos de más alta complejidad que los mismos ácidos no es sencilla: un ejemplo puede ser la síntesis de aminoácidos y luego proteínas; otro ejemplo es la síntesis de ácidos grasos y luego lípidos de alto peso molecular y complejidad. Pero además los ácidos orgánicos componentes del ciclo de Krebs sirven para equilibrar el exceso de cationes que entran en el interior de la célula, y así mantener la electroneutralidad en el medio interno. A su vez el protón del ácido es excretado al medio externo en intercambio por el catión que entró y así también se mantiene la electroneutralidad del medio externo. Dependiendo la especie, e inclusive la variedad, el ácido puede ser cítrico, aconítico o málico. Este ha sido un tema que oportunamente me interesó.

Estas dos funciones, la síntesis de moléculas más complejas y el mantenimiento de la electroneutralidad, se realizan usando como sustratos algunos de los intermediarios del ciclo de Krebs. Ahora bien este es un ciclo que se mantiene andando porque en algún paso de ese ciclo, que toma como su inicio, se introduce un compuesto con dos carbonos y en otros pasos se liberan los dos carbonos como CO₂ y más una cierta cantidad de energía reductora, regenerándose al final el aceptor de los dos carbonos, y así recomienza el ciclo. Es decir que entra tanta materia como la que sale, pero no más. Visto así la razón de ser del ciclo es la de convertir una forma de energía química en otras formas de energía química. Qué ocurre cuando se sustraen compuestos del ciclo, es decir cuando sale del ciclo más materia de la que entra? El ciclo comienza a pararse a menos que sea alimentado desde afuera y en alguno de los pasos que lo componen. Y, en efecto, esto es lo que ocurre. Una enzima que tiene una ubicuidad a lo largo y a lo ancho del mundo vegetal y animal, la fosfoenolpiruvico carboxilasa, alimenta lateralmente al ciclo incorporando el equivalente a un CO₂ por cada una de las reacciones que cataliza. Si bien hay otros 3 o 4 enzimas que catalizan reacciones semejantes, es sin duda la mencionada la más importante. Cómo hace esta enzima para detectar que se están sustrayendo intermediarios del ciclo de Krebs para síntesis o para mantener electroneutralidad? Todavía no se sabe con certeza. Esta cuestión fue motivo de mi tesis a comienzo de los años setenta. Aunque estudiamos un material vegetal que acumulaba ácido trans-aconítico, y por supuesto acidificaba el medio, no pudimos visualizar el sistema de control ni el sistema que transmitía el mensaje.

Es de destacar que los componentes de este complejo sistema que es el ciclo de Krebs tiene un tiempo de permanencia muy corto, pero con un gran poder de regeneración. En efecto haciendo uso de información fácilmente disponible, de energía y compuestos orgánicos, el sistema repone rápidamente los componentes que se degradan. Como balance el orden se mantiene pero con un alto costo energético.

Se ve entonces que el sistema alcanza una complejidad tal que cuida al detalle cada uno de los innumerables pasos que hacen a las funciones de los organismos en su relación con el medio en que viven. Fundamentalmente generando subsistemas que permitan la supervivencia en un medio que no necesariamente le es el más favorable. Si todo el sistema ha alcanzado un estado estacionario o homeostasis, luego el ritmo de tránsito de la energía, o de cualquiera de los componentes del subsistema, estará dado por el paso más lento o por una reacción de orden. Con lo que si bien en alguno de los pasos puede haber más componentes que en el siguiente, ninguna de las dos cantidades cambia con el tiempo. Cuando por alguna circunstancia el ritmo de tránsito se modifica hacia arriba o hacia abajo se alcanza otro estado de homeostasis que es el más adecuado para las condiciones imperantes en ese sistema o subsistema. Es lógico pensar que esta adecuación se cumple dentro de ciertos valores y así se explica por que las catástrofes pueden ocurrir y ocurren más frecuentemente de lo esperado. No obstante ello es remarcable como el orden y la complejidad permiten que los seres vivos prosperan en un medio que le es inhóspito.

Es así entonces que el mundo en que vivimos es producto de la lucha que se ha emprendido contra el flujo de

energía hacia el desorden. En esa lucha hay otro mecanismo que me interesa destacar como una buena arma para reducir el flujo: es el aumento de permanencia en el sistema de los compuestos complejos. Los ejemplos de este caso son muchos: gas, petróleo, etc. La actividad biológica acompañada por ciertas formas de energía convirtió compuestos orgánicos biosintetizados en hidrocarburos, en gases sencillos, en lo que conocemos como carbón de piedra. Es decir que parte de la energía que fluye a través de nuestro sistema puede quedar atrapada durante un largo tiempo. En otras palabras salen del ciclo materia y energía que se estacionan provisoriamente por un tiempo considerable. Algunos de esos compuestos, que estaban estacionados, hoy los estamos usando en una forma que algunos califican como indiscriminada. Unos compuestos que nos interesan en esta charla, también son productos de la biosíntesis y gozan de características de complejidad, orden y larga permanencia. Son las sustancias húmicas que forman parte de lo que se conoce como suelo: un complejo inorgánico, orgánico y gaseoso que sirve de soporte y alimento a las plantas superiores. Plantas y suelos componen en definitiva una parte importante del sistema que describimos al principio y en el cual vivimos.

Quiero aquí hacer una disgregación. Irónicamente parecería que los seres humanos hoy estamos dedicados a ponernos no a favor sino en contra de los sistemas que el mundo que conocemos desarrolló para luchar en contra del ritmo de flujo de energía desde el sol hacia la entropía. Estamos desordenando más de lo que ordenamos? El manejo del suelo, el uso indiscriminado de los recursos energéticos no renovables para satisfacer

el aumento de necesidades de una población en constante aumento nos llevará indefectiblemente hacia el final que predice el flujo de energía: la entropía o desorden sin vida?

Una esperanza es que el formidable aumento de conocimientos que continuamente se están generando puedan ser oportunamente adecuados para incrementar la reducción del ritmo del flujo de energía o al menos mantener una homeostasis que contemple los requerimientos de una vida digna en el sistema.

Volviendo a los ácidos húmicos estos son en realidad una sucesión de complejos orgánicos con base comunes, más algunas adiciones laterales, que se polimerizan para dar compuestos que cubren un amplio rango de pesos moleculares. Los de más bajo peso molecular son los más móviles, los más jóvenes y los más fácilmente degradables. Lo contrario ocurre con los de alto peso molecular, 1000.000 o más, que son viejos, inmóviles y muy poco degradables, al punto que tienen un tiempo de resistencia o permanencia media de cientos de años. Estos ácidos húmicos junto con residuos vegetales y animales y compuestos orgánicos biosintetizados que derivan de su descomposición o son excretados por organismos vivos componen lo que se conoce como la materia orgánica del suelo. Pero ete aquí que salvo los ácidos húmicos los demás compuestos son fácilmente degradables. Así en el término de días cerca del 80% de la materia orgánica es mineralizada y el C original es recobrado como CO₂. Del 20% restante la mayor parte va a formar otros compuestos orgánicos algo más resistentes a la degradación y solo un pequeñísimo porcentaje permanece en el suelo como ácido húmico que finalmente se estabiliza en polímeros de alto peso molecular a lo largo de muchos años.

La interacción entre la superficie de la fase inorgánica del suelo y su fase orgánica es la responsable de muchas de las más importantes características fisicoquímicas de los suelos.

El hecho que exista esa marcada diferencia en el tiempo de permanencia nos ha beneficiado y nos beneficia enormemente. En efecto, justamente esa combinación e interacción de grandes superficies de las fase mineral con la fase orgánica le confiere a los suelos la capacidad de persistir en el tiempo pese a la acción del hombre. Vemos que estamos nuevamente ante la presencia de un subsistema en el cual la alta complejidad y el alto orden estacionan durante mucho tiempo parte de la energía que fluye a través del sistema.

Ahora bien, cómo una pequeña parte de ese orden armando para reducir el pasaje de energía contribuye a la absorción de los micronutrientes por las plantas superiores que crecen en el ambiente suelo? Para explicarlo y dar por finalizada esta charla vamos a tomar un ejemplo que es caso del catión hierro. Este microelemento aunque abundante en el medio suelo solo está disponible para las raíces de los vegetales en una muy pequeña cantidad. En efecto normalmente en la solución de los suelos agrícolas deberían existir concentraciones de hierro muy bajas, de entre 10 a la menos 11 a 10 a la menos 12M. Es decir una millonésima de una millonésima. Estas concentraciones son mucho más bajas que las que necesitan las plantas. Sin embargo asegurar una buena nutrición.

En efecto en el suelo las sustancias húmicas de alto peso molecular y larga permanencia acomplejan los metales pesados, entre ellos el hierro, sustrayéndolos de la solución del suelo y así de las reacciones químicas que darían como resultado la síntesis de óxidos e

hidróxidos de hierro de muy baja solubilidad. De cualquier manera el hierro acomplejado en las sustancias húmicas está más disponible para las plantas ya que otros ácidos orgánicos, inclusive del tipo de húmicos de muy bajo peso molecular, son biosintetizados en el suelo y compiten por ese hierro que los de alto peso molecular habían acomplejado. Estos ácidos orgánicos más simples si bien están en muy pequeña concentración y son mucho más lábiles, atrapan el hierro. Como son solubles y móviles el hierro queda más disponible para las plantas. Por su parte las plantas no se quedan inactivas ante la situación de carencia de hierro y excretan al medio protones que acidifican el medio solubilizando más hierro y ácidos orgánicos como el cítrico que atrapa el hierro formando un complejo que puede atravesar la membrana de las células hacia el interior de la planta.

De manera entonces que los ácidos orgánicos del suelo y los ácidos de la planta colaboran para que el hierro pueda ser absorbido por las plantas. Por supuesto que el escenario real no es tan simple y ni siquiera está totalmente dilucidado. Pero lo que quería recordarles, además de estar relacionados con lo que estoy trabajando, que la naturaleza ha evolucionado hasta formar sistemas muy complejos por que se tiene la información necesaria. Sin ella no es posible lograr esa complejidad que significa orden. Sin esa información las chances de revertir el desorden hacia el orden son muy bajas. Nosotros podemos manejar una buena parte de esa información y continuamente estamos logrando más y más información. Está en nuestra naturaleza el usar esa información en forma correcta sin poner en peligro nuestra existencia.