

El suelo, un reactor químico muy interesante

Francisco Bautista Zúñiga,¹ Víctor Manuel Luna Pabello²
y Carmen Durán de Bazúa²

Introducción

Un reactor es aquel equipo en el que se lleva a cabo una reacción, para lo cual se necesita: a) la materia que se va a transformar, b) energía para llevar a cabo las reacciones, la maquinaria que canalice la energía y, finalmente, c) los productos del proceso (Figura 1).

Cuando se escucha la palabra "reactor" imaginamos rápidamente una gran maquinaria, producto de la inventiva humana (Figura 1). Sin embargo, existen reactores en los que la creatividad del hombre no está involucrada. Éstos son los que la propia naturaleza ha creado. Un claro ejemplo se puede apreciar en el proceso de fotosíntesis, llevado a cabo por las plantas. En la fotosíntesis, la materia que se va a transformar está esquemáticamente representada por agua y CO₂, la energía fotónica es proporcionada por el Sol, los cloroplastos cumplen la función de la maquinaria y los productos son glucosa y oxígeno (Fried, 1991) (Figura 2).

Existen reactores elaborados por el hombre, como los reactores de biodiscos o biológicos rotatorios (RBRs), mediante los cuales se da tratamiento a las aguas residuales domésticas e industriales para eliminar sustancias orgánicas biodegradables disueltas. La maquinaria está representada por los microorganismos (bacterias, hongos, protozoarios y micrometazoarios), adheridos a los biodiscos, contruidos de material inerte; la energía es proporcionada por la materia orgánica presente en el agua a tratar y el propio sistema servomotor del reactor, y los productos obtenidos son, principalmente, nueva masa celular, bióxido de carbono y agua, como resultado de la oxidación total de la materia orgánica (Figura 3).

El suelo, un reactor natural

El suelo es un reactor natural sumamente importante, debido a que las transformaciones que se realizan en él dan productos necesarios para los seres vivos. En este sistema ocurren diversos procesos, entre los que destacan: adsorción, absorción, precipitación, descomposición, mineralización y humificación (Richter, 1987). Los tres últimos procesos convierten al suelo en un

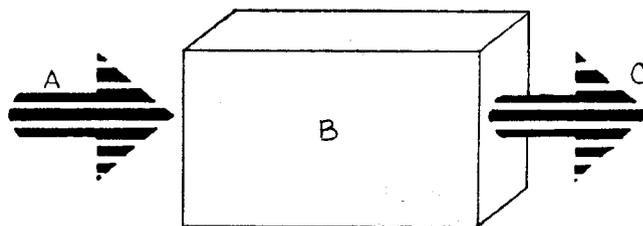


Figura 1. Modelo básico para un reactor. a) La materia que se va a transformar debe entrar al reactor; b) se necesita energía y maquinaria para llevar a cabo esa reacción, y c) se obtienen los productos del proceso.

gigantesco sistema de tratamiento de residuos orgánicos (RO), en el que algunas de las sustancias provenientes de los restos de animales y plantas se degradan y otras se humifican, es decir, se transforman en *humus* (ácido húmico y ácido fúlvico, principalmente).

Esto hace que el suelo funcione como un reactor purificador del ambiente. Por ejemplo, en el tratamiento de los residuos orgánicos mencionados arriba, en la depuración del agua que pasa a través de él y en la transformación de diversos compuestos tóxicos, como los plaguicidas (Figura 4).

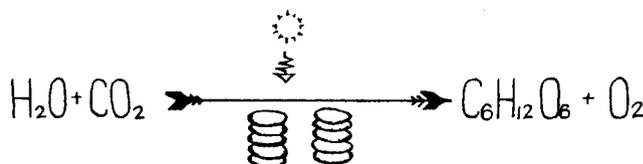


Figura 2. Las plantas como reactores. En este caso, el agua y el dióxido de carbono constituyen la materia que se va a transformar, la energía es proporcionada por el Sol, la maquinaria son los cloroplastos, y los productos son la glucosa y oxígeno molecular.

¹ PROTRÓPICO, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnica, Universidad Autónoma de Yucatán.

² PIQAYQA, Facultad de Química, UNAM

* Recibido: 31 de marzo de 1995; Aceptado: 10 de mayo de 1995.

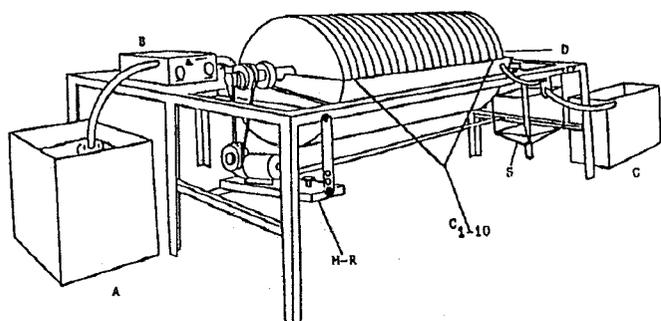


Figura 3. Reactor biológico rotatorio (RBR) experimental: (A) tanque de alimentación; (B) bomba peristáltica; (C) tanque colector; (C₁₋₁₀) cámaras del RBR; (D) discos; (M-R) motor-reductor; (S) sedimentador secundario.

La maquinaria

En el suelo, los microorganismos son los responsables de la transformación de la materia orgánica biodegradable. Los tipos de microorganismos más frecuentemente encontrados en un gramo de suelo son: bacterias (3,000,000 a 500,000,000 de organismos), hongos (5,000 a 900,000), algas (1,000 a 500,000), protozoarios (1,000 a 500,000) y nemátodos (50 a 200). Se calcula que estos organismos degradan de 10 a 200 toneladas por hectárea de materia orgánica presente en ciertos residuos orgánicos (Metting, 1993).

En el suelo también se encuentran arcillas que son producto del intemperismo y de la neoformación mineral. Algunos ejemplos de ellas son: esmectita, caolinita, ilita, augita, biotita, magnetita, lepidocrita, hematita y otras (Bohn, 1993). Las arcillas

promueven y catalizan la formación de *humus* a partir de sustancias más simples como azúcares, aminoácidos y quinonas; además, participan en el relevante fenómeno de intercambio catiónico, debido al cual es posible el almacenamiento de elementos nutritivos para el crecimiento de las plantas (Bohn, 1993).

Los microorganismos y arcillas, en el presente ejemplo, representan la maquinaria del reactor, ya que son los responsables de la degradación y transformación de la materia orgánica presente en el suelo.

Energía

Para el funcionamiento del reactor se requiere de energía, la cual es obtenida de la materia orgánica, que contiene una considerable energía potencial que puede transformarse fácilmente a otras formas de energía o ser liberada en forma de calor.

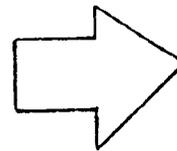
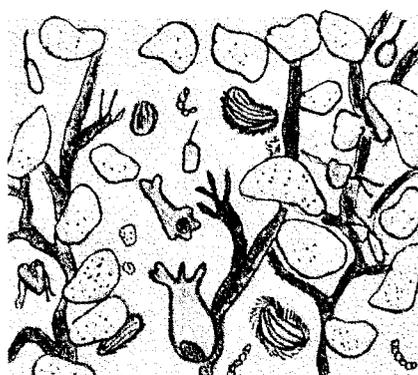
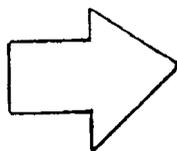
Para comprender lo anterior, tenemos que recordar la constitución de la materia orgánica. Entre sus principales compuestos, encontramos azúcares, almidones, proteínas de bajo peso molecular, hemicelulosa, celulosa, ligninas, grasas y ceras, en orden decreciente, según su facilidad de descomposición (Buckman y Brady, 1977), la cual se lleva a cabo por oxidación a través de un proceso de digestión enzimática de los microorganismos.

Procesos de transformación de la materia orgánica

Existen dos procesos importantes en el suelo, retención y transformación. Estos, junto con la acción de los microorganismos, dan lugar a la formación de compuestos orgánicos más estables y resistentes a la degradación bioquímica.

Los procesos de retención representan la capacidad del suelo de retener o contener ciertos tipos de compuestos, evitando que se lixivien hacia capas más interiores del suelo o hacia mantos freáticos. En estos procesos intervienen fuerzas de unión química, tales como:

Materia orgánica animal y vegetal (aminoácidos, polipéptidos, azúcares, celulosa, lignina, grasas).



Sulfatos, fosfatos, amoníaco, humus, alcoholes, bióxido de carbono, agua.

Figura 4. El suelo como reactor: a) energía, representada por la materia orgánica; b) la maquinaria, representada por los microorganismos y los constituyentes del suelo (arcillas principalmente), y c) productos finales, destacando el *humus*.

- a) Fuerzas de Van der Waals o dipolos momentáneos
- b) Fuerzas coulombicas o electrostáticas
- c) Transferencia de carga (enlaces iónicos y covalentes)
- d) Intercambio de ligandos
- e) Orientación dipolo-dipolo (permanente)
- f) Inducción dipolo-dipolo
- e) Quimiabsorción

Muchas de estas reacciones pueden presentarse simultáneamente o en condiciones similares, complicándose el conocimiento a detalle del mecanismo por el cual se retuvo tal o cual sustancia orgánica soluble, ya que en la retención intervienen factores como la porosidad del suelo, su textura, el tipo de arcilla, su estructura, su grado de compactación, entre otros elementos físicos. El nivel de complejidad aumenta cuando se utilizan mezclas de compuestos orgánicos.

La transformación (descomposición) de la materia orgánica se realiza a través de dos mecanismos (Tate, 1987):

El primero es conocido como *mineralización* y se refiere a la descomposición de la hojarasca y otros residuos vegetales y animales, dando como productos compuestos inorgánicos, entre ellos sales solubles (sulfatos, fosfatos, amoníaco, iones amonio libre, entre otros). Los compuestos orgánicos remanentes, junto con estos compuestos inorgánicos, al reorganizarse, pueden dar lugar al *humus*.

El segundo es la humificación propiamente dicha y se refiere a la transformación de la materia orgánica en *humus* de manera directa, sin pasar por la mineralización primaria.

Además, en los procesos de retención y transformación intervienen la fotooxidación por la luz solar, la oxidación química, el cambio en los valores de pH y la conversión en sustancias

inorgánicas y la polimerización y la oxidación microbiológica.

Productos

Muchos compuestos orgánicos, principalmente compuestos fenólicos, se afectan principalmente por procesos de polimerización. Estos precursores del *humus*, que al oxidarse producen semiquinonas se asocian con los polipéptidos y sacáridos. Se forman, en primer lugar, los ácidos fúlvicos, en los que las cadenas alifáticas predominan sobre los núcleos aromáticos. En segundo lugar, le siguen los ácidos húmicos, debido al aumento de los núcleos y disminución de las cadenas alifáticas y, de grupos funcionales, como carboxilos.

Es necesario considerar que, si bien los fenoles son los precursores del *humus*, también son sustancias consideradas tóxicas por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, por sus siglas en inglés) y pueden exterminar principalmente a los microorganismos del suelo y a los organismos acuáticos si su destino fuera algún cuerpo de agua.

Además de estos productos, tenemos los originados por la acción enzimática de los microorganismos, tales como los aminoácidos, amidas, alcoholes, aldehídos, metano y bióxido de carbono.

Importancia de la interacción residuo-suelo

Recientemente, se le ha dado mucha importancia a la utilización del suelo como un medio en el que se pueden reusar y/o tratar algunos residuos orgánicos. La EPA, reconoce como tecnología de manejo de residuos orgánicos (RO), la utilización del suelo para tratarlos, que recibe el nombre de *Land Treatment (LT)*.

El tratamiento con suelos (*land treatment*, en inglés) se divide en dos partes: utilización (reuso) y tratamiento. Esta

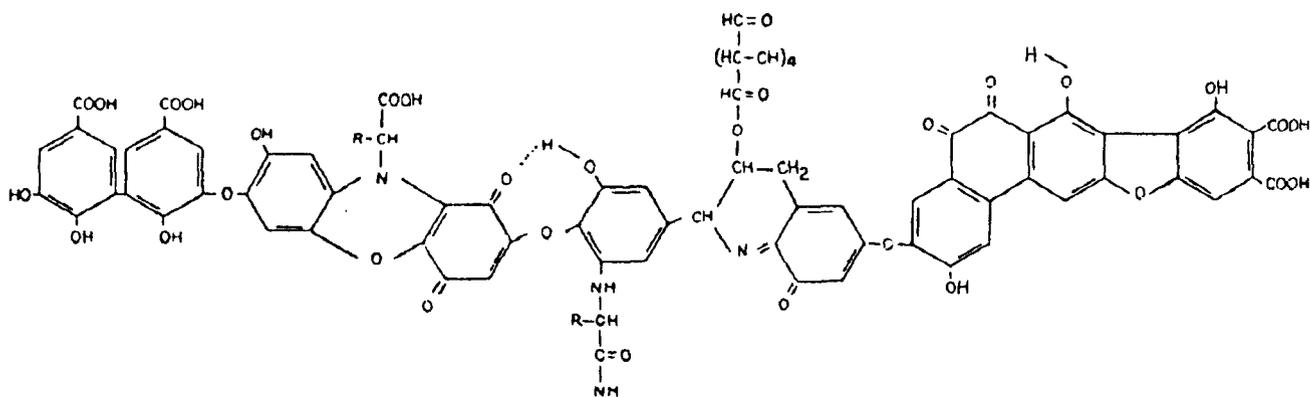


Figura 5. Estructura hipotética del ácido húmico, uno de los principales productos del reactor suelo. (Tomada de J.J. Mortuedi, P.M. Giordano y W.L. Lindsay (comp.), *Micronutrients in Agriculture*, American Society of Agronomy, Madison Wisconsin, 1971.)

tecnología incluye como residuos al estiércol, lodos residuales y municipales, así como los RO provenientes de industrias agroalimentarias y alimentarias, en general, a los productos forestales y acuícolas y a las aguas con RO que pueden ser usados como inductores del suelo y/o mejoradores (acondicionantes o enmiendas) de los suelos, sean agrícolas o no (Figura 6).

Cuando se usan para suelos agrícolas, se debe tener en cuenta la compatibilidad entre el residuo y la(s) planta(s) cultivadas, (por la aplicación que pudiera ser antes o después del establecimiento del cultivo) y su influencia en la producción agrícola. Esto se debe a que algunas RO pueden destruir el suelo y las plantas que en él crecen, por lo que se deben estudiar los efectos que pudieran ocasionar, tanto en el suelo como a las comunidades vegetales, sean o no cultivadas.

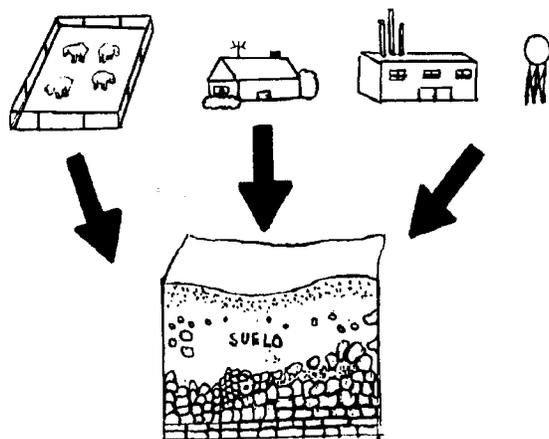


Figura 6. El suelo, un sistema de tratamiento y reutilización de desechos industriales, agrícolas y del hogar.

Importancia de la materia transformada en el suelo

La materia orgánica biodegradable presente en el suelo y el *humus* que se deriva de ella, van a beneficiar las propias características físicas del suelo, como la estructura a través de la formación de macroporos, permitiendo una mayor aeración y un mejoramiento del drenaje, un incremento de la permeabilidad y una mayor retención de la humedad en los suelos donde predominen las arenas. Evita la desecación y la contracción del mismo. Eso puede dar lugar a un mejor desarrollo de las plantas, ya que tendrán a su disposición una mayor cantidad de agua y nutrientes.

Además, la materia orgánica evita la erosión y pérdida de los suelos por factores del clima, como la lluvia y el viento.

Estos beneficios pueden mejorar los suelos infértiles o muy jóvenes, en donde su parte más superficial no contenga la suficiente materia orgánica que sea capaz de conferirle las características citadas anteriormente.

Pero no todos los tipos de suelo tienen la misma eficacia para asimilar materia orgánica biodegradable, ya que no todos están sometidos a las mismas condiciones físicas, químicas y biológicas, debido al clima, la roca madre original, la topografía, la vegetación, la edad de cada uno de ellos y las alteraciones causadas por el hombre.

Es por eso que es necesario realizar estudios acerca de las características del suelo a mejorar y de los residuos a colocar, para que los procesos de retención y transformación que se lleven a cabo dentro de él ayuden a mejorar sus características físico-químicas y, con esto, su conservación. Hay que recordar que el suelo es un recurso natural no renovable y que su transformación tardó miles de años y que el hombre, debido a su inadecuado manejo, acelera su deterioro y pérdida. Pero aún podemos evitarlo, utilizando sus propiedades de reactor. Todo es cuestión de colocarle el combustible adecuado (residuos orgánicos biodegradables), para que la maquinaria (microorganismos y arcillas), dé lugar a productos benéficos para el suelo.

El tratamiento con suelos debe ser conocido, planeado y manejado con el mismo interés que cualquier otro proceso de

depuración. La complejidad de los procesos de interacción residuo-suelo debe conocerse ampliamente con el fin de evitar la contaminación del ambiente.

Esta planeación comienza con:

- El desarrollo de una base de datos del sitio, (clima altitud, hidrología, topografía, fauna y principales cultivos de la región), del suelo (origen, tipo de suelo, propiedades físicas como textura, porosidad, tipos de agregados, propiedades como el pH, intercambio iónico, etcétera) y del residuo (fuente de origen, composición, cantidad de carbono y otros elementos bioasimilables, características fisicoquímicas, etcétera).
- Identificación de las características limitantes del suelo y del residuo.
- El nivel de disminución de los daños en la salud y el ambiente por algún posible accidente en el manejo del residuo.

Es claro que los mecanismos de operación no serán iguales para dos sitios, porque ambos siempre tendrán algo distinto, al igual que el suelo que los conforma, pero es posible agregar los RO dependiendo de su origen y composición y, con esto, plantear de manera general algunos lineamientos para su manejo.

Los RO deben cumplir con algunos requisitos para ser usados como mejoradores edáficos; los principales son:

- No rebasar los límites permisibles para metales pesados.
- No contener cantidades excesivas de sales solubles.
- Se deben conocer la dosis con las cuales se asegure una máxima producción, sin causar daño al ambiente por migraciones de los componentes de los RO.
- La aplicación y/o incorporación de los RO no debe requerir prácticas agrícolas excesivas o adicionales (especialmente consumos exagerados de energía).

e) Debe asegurarse la biodegradación de los componentes de los RO en un periodo razonable de tiempo y de no depositar y/o producir sustancias tóxicas.

f) Es deseable que los RO tengan una relación de carbono-nitrógeno (C/N) mayor de 30, ya que si se tiene una menor cantidad de N, es necesario adicionarlo para una degradación y/o asimilación más adecuada por parte de los microorganismos.

g) La susceptibilidad de contaminación por viento, agua y problemas de olor, deben ser mínimos.

h) No deben ocasionar daños a las propiedades físicas del suelo, como porosidad, estructura, conductividad hidráulica y aeración.

i) No debe poner en peligro la salud de la población ni de los animales.

Dada la importancia de las transformaciones que se llevan a cabo en el suelo, se han instrumentado algunos tratamientos a residuos industriales de tipo orgánico vertiéndolos directamente sobre el suelo (como es el caso del riego de vinazas diluidas de las empresas productoras de alcohol etílico a partir de vinazas) (Durán y Cordovés, 1994).

Pero no todos los tipos de suelo tienen la misma eficacia, ya que no están sometidos a las mismas condiciones físicas, químicas y biológicas, como ya se dijo, debido al clima, la roca madre, la topografía, la vegetación, la edad de cada uno de ellos y las

alteraciones causadas por el hombre.

A causa de nuestra ignorancia respecto a este importante recurso, le hemos dado un inadecuado manejo, acelerando su deterioro y en muchos casos cubriéndolo con desechos sólidos, roca, grava, cemento y varilla, sin concientizarnos de que es un regalo de la naturaleza que tarda miles de años en formarse y que, como reactor es sumamente eficiente, barato, no contaminante y muy superior a cualquier tecnología humana.

Bibliografía complementaria

Bohn, H., *Química del suelo*, Limusa, México, 1993, 168 p.
 Buckman, H.O. y Brady, N.C., *Naturaleza y propiedades de los suelos*, Montaner y Simón, España, p. 135-142, 1977.
 Durán, C. y Cordovés, M., *Consultancy Report. United Nations Industrial Development Organization*, Mexico City/Vienna, 1994, 147 p.
 Fried, G.H., *Biología*, McGraw-Hill, México, 1991, 75 p.
 Metting, B.F, Jr., *Soil Microbial Ecology*, Dekker, New York, p. 3-25, 1993.
 Richter, J., *The soil as a reactor*, Catena Verlag, p. 1-99, 1987.
 Tate III, R.L., *Soil organic matter biological and ecological effects*, John Wiley & Sons, 1987, 69 p.
 Vázquez, S.L., "Confinamiento controlado de residuos peligrosos. Una perspectiva geográfica", *GEO UNAM* (México), 2[1], 17-20 (1993). ■

Respuesta al calendario de Educación Química

SEPTIEMBRE

- | | |
|---|---|
| 1 Un gramo de terbio es más caro. | 16 Energía. Un electrón-volt equivale a 1.602×10^{-12} ergios. |
| 2 Dos, los característicos del grupo ácido COOH. | 17 Rojo escarlata, amarillo verdoso y verde. |
| 3 Del griego <i>technetos</i> = artificial. Éste fue el primer elemento producido artificialmente. | 18 Se funde primero la pieza de oro ya que el punto de fusión de este elemento es de 1,063C. |
| 4 Se descubrió primero el samario (62). | 19 En los diagramas de equilibrio líquido-vapor. |
| 5 Prácticamente un gramo. Compáralo con la masa atómica del átomo de hidrógeno. | 20 A la tercera etapa en el desarrollo de la humanidad, después del Paleolítico y el Neolítico. |
| 6 Si el pH es alcalino, se destruyen los enlaces iónicos entre las cadenas proteínicas del cabello haciéndolo quebradizo. | 21 Henry Ford. |
| 7 Acetato de plomo. | 22 Michael Faraday, quien nació un 22 de septiembre de 1791 en Inglaterra. |
| 8 Ocho. | 23 126.26 K. |
| 9 Las leyes de Dalton y de Henry. | 24 Tiocianato de potasio. |
| 10 98 g/mol; es el H ₂ SO ₄ . | 25 Partículas subatómicas. |
| 11 <i>Polyvinyl chloride</i> . El polímero cuyo nombre en castellano es policloruro de vinilo. | 26 C ₁₉ H ₂₈ O ₂ . |
| 12 La AM (30,000 cm). FM (300 cm). | 27 Es la sal de potasio de la penicilina V. |
| 13 101.4°C. | 28 Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ |
| 14 Catorce. La fórmula del ácido mirístico es: CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH. | 29 El motor de combustión interna que lleva su nombre. |
| 15 Quince: Ac, C, Ca, Cd, Ce, I, In, N, Na, Nd, Ne, Ni, P, Pa, Pd. | 30 No, la fórmula del naproxén es C ₁₄ H ₁₄ O ₃ . |