

LA ENERGÍA EN LA FORMACIÓN DE LOS SUELOS: ASPECTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS PARA SU EVALUACIÓN

AMÉRICO DEGIOANNI; ESTELA BRICCHI & EUGENIO HAMPP

Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta 36 km 601. X5804BYA Río Cuarto. Argentina. adegioanni@ayv.unrc.edu.ar

Recibido: 01/10/07

Aceptado: 22/05/08

RESUMEN

El suelo es un sistema abierto que tiende hacia un equilibrio dinámico acumulando y reciclando materia y energía a través del tiempo. Mediante un balance energético es posible evaluar la energía acumulada o la que circula a través de su masa. Esta miscelánea tiene por objetivo presentar aspectos teóricos y metodológicos para cuantificar la energía dinamizada durante la formación de un sistema suelo y analizar la relación entre ésta y algunas propiedades físicas, físico-químicas y químicas que definen la capacidad de producción del suelo. Se describió un modelo de balance energético para el cálculo de la energía en la formación de los suelos y se analiza la relación entre ésta y el contenido de arcilla, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, saturación con bases y capacidad productiva. Se aplicó la metodología de cálculo para tres suelos zonales argentinos. Se observó una relación positiva entre la cantidad de energía dinamizada durante la formación de los suelos con la génesis de arcilla, el contenido de materia orgánica, la lixiviación de bases y la productividad primaria de fitomasa nativa. Si bien el modelo energético presentó algunas limitaciones para su aplicación, el mismo se presentó una metodología novedosa para estudiar aspectos relacionados con génesis, relaciones clima-suelo-vegetación y capacidad de producción de los suelos.

Palabras claves. Sistema suelo, modelo energético, productividad.

ENERGY IN SOIL FORMATION: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL ASPECTS FOR ITS EVALUATION

ABSTRACT

The soil is an open system that accumulates and recycles matter and energy over time. By modeling the energy balance, the energy that accumulates or circulates through soil mass may be assessed. The objective of this study was to present theoretical and methodological aspects that quantify energy dynamized during soil formation and to analyze the relationship between this energy and some physical, physico-chemical and chemical properties that define soil production capacity. The study describes a model of energy balance that calculates the annual use of solar energy to dynamize the genesis processes and maintain the dynamic balance of the soil over time. We analyzed the relationship between energy dynamized with clay, organic matter, cation exchange capacity, pH, saturation with bases and productive capacity for three regional soils of Argentina. A positive relationship was observed between the amount of energy dynamized and the amount and type of clay, organic matter content and primary productivity. Even though the model presented some limitations for widespread application, it introduced a new methodology to study aspects related to soil genesis, climate-soil-vegetation relationships and the productive capacity of the soil.

Keywords. Soil system, energy modelling, productivity.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema abierto que acumula e intercambia materia y energía con su entorno (Bricchi & Degioanni, 2006). La formación de un sistema suelo es conducida por gradientes de potencial químico y físico que se producen entre la atmósfera y la biosfera en interacción

con rocas y minerales (Chadwick & Graham, 2000). Durante esta etapa, el suelo incorpora y almacena más energía que la que cede disminuyendo su entropía interna y adquiriendo, de esta manera, un determinado nivel de energía libre cuando alcanza el equilibrio energético cuasi-estacionario (Smeck *et al.*, 1983). Cuando los flujos de materia y energía que circulan a través de su masa (calor, agua,

carbono y elementos químicos en solución o suspensión), se hacen relativamente constantes, el suelo alcanza un determinado grado de evolución y diferenciación del perfil. Estas características, propias de un sistema abierto, hacen que cada suelo alcance un determinado nivel de energía libre que se expresa a través de la calidad de sus propiedades, en la velocidad de los flujos que circulan a través de su masa y en la capacidad de auto-equilibrio (Bockheim, 2005).

La energía disponible en una sustancia o una reacción puede ser determinada a partir de la energía libre de Gibbs (Bohin *et al.*, 1993). Por ejemplo, el contenido de energía acumulada en minerales silicatados y no silicatados de diferentes suelos oscila entre los 38,5-49,5 kcal g⁻¹ y 0,4-29,5 kcal g⁻¹, respectivamente, (Volobuyev, 1974), en la materia orgánica total oscila entre los 1,5 y 142 cal g⁻¹ (Volobuyev, 1974) y en el humus de 5,4 kcal g⁻¹ (Odum, 1996). Estas mediciones son relativamente fáciles de determinar en el laboratorio pero no lo son tanto en los sistemas biofísicos como los suelos. Esto se debe, en primer lugar, a que la composición mineralógica de un suelo resulta difícil de determinar. La constitución de la fracción arcillosa se llega a conocer sólo parcialmente ya que no existen límites absolutos de tamaños, constitución y por ende de la actividad. Por otro lado, la fracción esquelética también es de naturaleza compleja puesto que, además de la gran variabilidad mineralógica, se suma la variabilidad en el tamaño de las partículas. Similares consideraciones le caben a los compuestos húmicos: son de estructuras sumamente complejas, poco conocidas y con funciones que dependen de las interacciones con los minerales, particularmente con las arcillas (Bohin *et al.*, 1993).

Los principios termodinámicos permiten valorar los flujos y la calidad de la energía en los sistemas. La termodinámica evalúa los cambios de energía libre y la entropía de las reacciones químicas y posibilita establecer niveles o estados energéticos de los sistemas. Minasny *et al.* (2008) recopilando valores de energía libre y entropía para diferentes suelos, rocas y minerales comprueban la existencia de una relación inversa entre ambas variables. Zapata Hernández (2006) presenta valoraciones cuantitativas de entropía en tres suelos de una toposecuencia a partir del contenido de óxidos sobre la composición mineralógica total. Si bien este enfoque permite establecer un estado energético en valores cuantitativos, el cálculo numérico en los sistemas suelos resulta de compleja aplicación por las consideraciones realizadas en el párrafo anterior. En esta misma línea de análisis, Smeck *et al.* (1983) representaron en una escala gráfica los cambios de energía libre y entropía para diez órdenes de suelos de la Taxonomía de Suelos a partir del análisis de los procesos de meteorización de minerales primarios, mezclado físico, eluviación-iluviación, acumulación de materia

orgánica, formación de minerales secundarios y lixiviación. Estos autores determinan estados energéticos para los diferentes órdenes de manera cualitativa y con resultados que presentan diferencias con los obtenidos por métodos numéricos (Minasny *et al.*, 2008).

Otra forma de evaluación energética en un sistema suelo es calcular la energía necesaria para dinamizar los procesos generales de la génesis: adiciones, pérdidas, transformaciones y translocaciones. Estos procesos conceptualizados por Simonson (1959) a escala de pedón, utilizan como fuente de energía casi exclusiva la radiación solar y en menor medida la gravedad (Chadwick & Graham, 2000; Hoosbeek *et al.*, 2000). En esta línea de valoración energética de los sistemas suelos es bastante citado el trabajo de Runge (1973) quien intentó fusionar el modelo factorial de génesis propuesto por Jenny (1941) con los procesos definidos por Simonson (1959). Este autor argumenta que la formación del suelo es conducida principalmente por el flujo de agua hacia adentro del mismo accionada por la fuerza de gravedad (procesos de lavado y lixiviado) y por el flujo desde el suelo a la atmósfera por la transpiración de las plantas (proceso esencial para la producción de materia orgánica). Con este modelo, el autor explicó la génesis de un horizonte B arcilloso en un paisaje loessico. Recientemente el modelo ha sido utilizado en investigaciones sobre pedogénesis por Brye (2004) y Schaetz & Schwenner (2006). A pesar de su utilización en trabajos recientes, el modelo sigue siendo una línea más bien cualitativa y no cuantitativa en la evaluación energética de los sistemas suelos.

Una valoración cuantitativa de la energía de formación es realizada por Regan (1977). Este autor, utilizando los parámetros de transformación energética propuestos por Odum (1971), desarrolló un modelo energético para simular la pedogénesis de un suelo mineral en Florida (USA). Este modelo subestima la tasa energética anual y el tiempo de formación del suelo pero resulta un excelente ejemplo de vinculación entre la energía dinamizada en los sistemas suelos, la vegetación y la actividad humana (Minasny *et al.*, 2008).

Un importante aporte en materia de evaluación energética en términos cuantitativos y que es poco conocido lo realiza Volobuyev (1964). Este autor, al estudiar la distribución geográfica de los suelos en el mundo, concluyó que los diferentes tipos genéticos se desarrollan dentro de determinados intervalos de los dos flujos energéticos claves en la formación del suelo: radiación solar y precipitación. A partir de relaciones empíricas, este autor desarrolló un modelo matemático que cuantifica el flujo anual de energía de formación y estableció en que proporción dicha energía es utilizada en diferentes procesos pedogenéticos.

Si bien el modelo propuesto por Volobuyev (1964) no explica en detalle el origen de las características pedológicas de los suelos, provee una aproximación numérica sobre la energía dinamizada durante la formación a escala regional, continental y global. Según Minasny *et al.* (2008) esta metodología es una elegante forma de representar el factor climático de la pedogénesis. Sin embargo, algunos autores la han utilizado para estudiar la relación entre la energía de formación y diferentes procesos y propiedades de los sistemas suelos. En tal sentido, Nikolskii *et al.* (2001), Tetumo García *et al.* (2001) y Contreras *et al.* (2002) para suelos mexicanos formularon distintas funciones estadísticas entre los flujos energéticos que ingresan al suelo (radiación solar y precipitación) con pH, materia orgánica, fósforo, calcio, sodio, magnesio, potasio, saturación con bases, capacidad de intercambio catiónica y arcilla. A partir de tales funciones estudiaron posibles cambios en dichas propiedades por efecto de modificaciones en las condiciones microclimáticas inducidas por el riego. Castillo Álvarez *et al.* (2007) incorporaron esta metodología para estudiar los posibles cambios en la fertilidad en suelos mexicanos y su incidencia en la productividad de trigo y maíz por efecto del cambio climático. Gogichaishvili & Maglakelidze (2007) calcularon la energía de formación para suelos de paisajes naturales en Georgia y determinaron relaciones entre esta con la productividad biológica y la eficiencia de utilización de la energía solar. Bricchi *et al.* (2006) determinaron la energía de formación para distintos órdenes de suelos argentinos y su relación con el contenido de materia orgánica. Rasmussen *et al.* (2005) cuantificaron los flujos de energía de la precipitación efectiva y la producción primaria neta en distintos tipos genéticos de suelos y determinaron funciones estadísticas para predecir el contenido de carbono y arcilla a escala continental para USA. En esta misma línea de trabajo, Rasmussen & Tabor (2007) establecieron tasas de eficiencia energética y transferencia de masa en diferentes pedones y calcularon funciones de pedotransferencia para predecir la profundidad del solum, el contenido de arcilla, índice de alteración de minerales y la proporción de óxidos de Fe libre. En estudios similares, Aber & Melillo (1991), Ugolini & Spaltensstein (1992) y Schlesinger (1997) encontraron relaciones entre la cantidad y distribución de las precipitaciones y energía solar con la producción primaria neta de carbono y por ende, con la materia orgánica del suelo y el ciclo de nutrientes con ella relacionados.

Esta miscelánea tiene por objetivo presentar aspectos teóricos y metodológicos que permiten evaluar cuantitativamente la energía en la formación de los suelos y analizar la relación entre esta con algunas propiedades físicas, físico-químicas y químicas que definen la capacidad productiva.

ASPECTOS TEÓRICOS

Balance energético en el sistema suelo

El balance energético en un sistema suelo puede ser modelizado mediante la ecuación 1 (Volobuyev, 1974):

$$dQ + \sum_1^i \mu_i dM_i = dU + dA \quad [1]$$

Donde:

dQ = energía que ingresa al sistema suelo

μ_i = unidad de energía relacionada con la unidad de masa en los procesos de intercambio de masa

dM_i = masa que ingresa al sistema suelo

dU = cambio de la reserva de energía interna del sistema suelo

dA = trabajo producido en el sistema suelo

En la parte izquierda de la ecuación 1 se incluyen los componentes de entrada de energía al sistema suelo que son la radiación solar y el flujo de materia, fundamentalmente el agua de lluvia y el carbono proveniente de la producción primaria neta del bioma vegetal. En la parte derecha de la ecuación, se incluye el cambio de la reserva de energía interna del sistema y el gasto total de energía como consecuencia del trabajo realizado por el mismo durante la etapa de formación del suelo o el gasto para mantener su equilibrio cuasi-estacionario. El gasto total de energía durante la formación de un suelo puede escribirse conceptualmente de la forma siguiente:

$$Qfs = Qdf + Qdq \pm Qfh + Qrbq + Qet + Qts + Qsa \quad [2]$$

Donde:

Qfs = cantidad de energía solar utilizada en los procesos de formación del suelo en

kcal cm² año⁻¹ o kJ cm² año⁻¹ o W m²

Qdf = cantidad de energía que se utiliza en procesos físicos de intemperismo

Qdq = cantidad de energía que se utiliza en procesos químicos del intemperismo

Qfh = energía que se acumula en el humus o se produce durante su mineralización

- Q_{rbq} = energía que se utiliza en las reacciones biológicas en la transformación de sustancias orgánicas y minerales del suelo
- Q_{et} = energía que se utiliza en el proceso de evapotranspiración
- Q_{ts} = energía que se utiliza en los procesos de migración de solutos y partículas coloidales
- Q_{sa} = energía que se utiliza en procesos de intercambio calorífico del sistema suelo-atmósfera

de la fitomasa nativa en diferentes tipos genéticos de suelos, encontró una relación proporcional entre el consumo o gasto total de energía para la formación del suelo (Q_{fs}) y la radiación solar neta para zonas con el mismo rangos de temperatura -denominados Termosecuencias y rangos del índice de humedecimiento (Kn)-denominados Hidrosecuencias. Este índice surge del cociente entre la evapotranspiración potencial y la precipitación media anual (Fig. 1).

Volobuyev (1964) al analizar numerosos datos sobre temperatura, lluvia, evapotranspiración y productividad

De estas relaciones se deduce que el gasto total de energía solar utilizada para la formación del suelo es mínimo en suelos desarrollados en ambientes de tundras

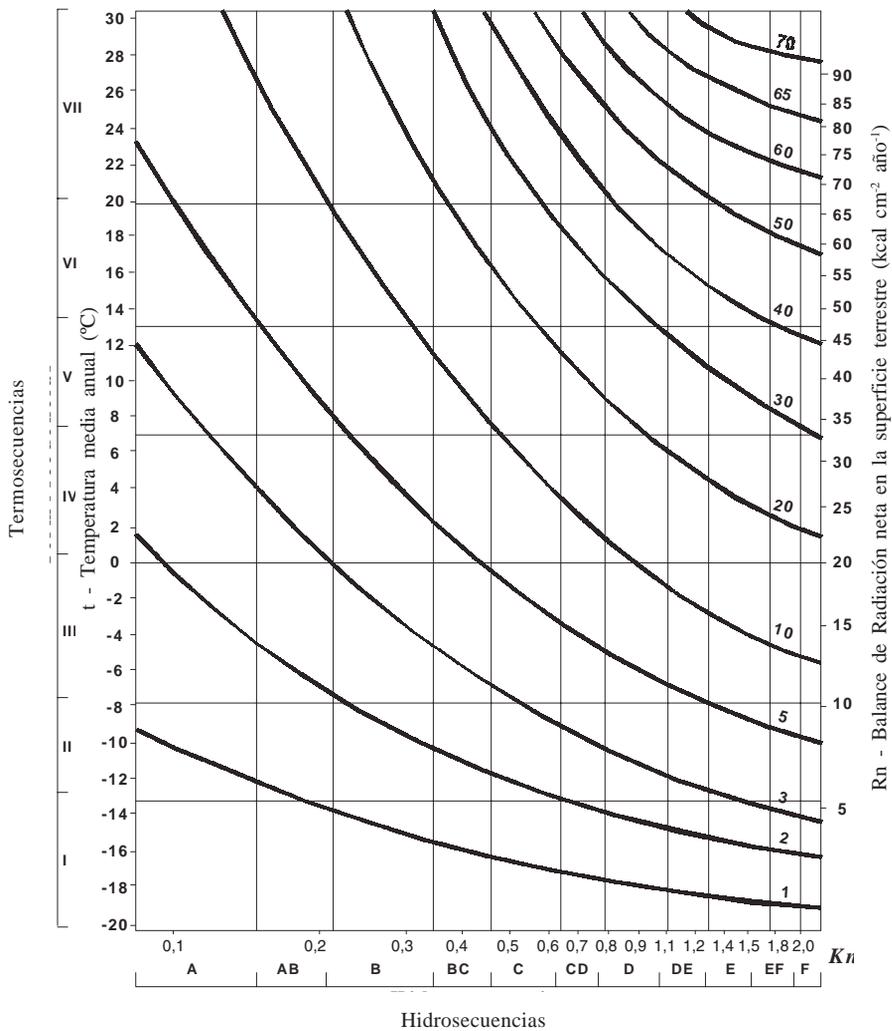


Figura 1. Relación entre energía de formación del suelo (kcal cm² año⁻¹), radiación solar neta, termosecuencias e hidrosecuencias (Volobuyev, 1964)

Figure 1. Relationship between net solar radiation, thermosequences, hydrosequences, and soil formation energy (kcal cm² yr⁻¹) (Volobuyev, 1964)

y desiertos: Qfs entre 1 a 5 kcal cm⁻² año⁻¹, intermedio en suelos de estepas subhúmedas-húmedas con valores de Qfs entre 20 a 40 kcal cm⁻² año⁻¹ y muy alto para suelos desarrollados en áreas tropicales húmedas con valores de Qfs en el orden de las 60 a 70 kcal cm⁻² año⁻¹.

Por otro lado, Volobuyev (1964) demostró que del total de energía consumida por el sistema suelo para generar y mantener su organización pedológica, el gasto más importante está vinculado a los procesos de evapotranspiración (Qet) y de intercambio calorífico del sistema suelo-atmósfera (Qsa). Estos procesos, que están en relación directa con la humedad del suelo y la actividad del bioma, consumen entre el 95-99,5% de la energía solar anual que llega al mismo. Los procesos vinculados a los ciclos biológicos de síntesis de la materia vegetal (Qfh , $Qrbq$) consumen en el orden del 0,5-5% de Qfs (frecuentemente alrededor de 1%), mientras que los procesos de intemperismo físico y químico de los minerales de la roca madre (Qdf - Qdq) y los procesos de migración (Qts) consumen solamente centésimas o milésimas partes de la energía solar total. En consecuencia, el consumo o gasto anual de energía para movilizar los distintos procesos que operan durante la pedogénesis y en el posterior mantenimiento de la organización del perfil es, en orden de importancia: evapotranspiración: procesos biológicos cíclicos: reacciones irreversibles de degradación mineral en una relación de proporcionalidad de 100: 1:0,01. Si bien las diferencias en el consumo por los tres procesos son muy grandes, hay un aumento regular consecutivo del consumo de energía para el intemperismo desde los suelos de las regiones menos húmedas hacia las zonas más húmedas. Lo mismo ocurre con el consumo de energía para dinamizar los procesos biológicos: en zonas con deficiencia de agua o calor los procesos biológicos gastan menos de 1% de la radiación solar mientras que el gasto asciende al 5% en zonas cálidas y húmedas. Este gasto de energía que depende de las condiciones hidrotérmicas, está directamente relacionado con la productividad primaria neta de fitomasa nativa. En zonas con déficit de calor o humedad la productividad es mínima mientras que en zonas cálidas y húmedas es máxima. En consecuencia, existe una elevada correlación positiva entre la energía de formación y la productividad anual de fitomasa nativa.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para el cálculo de la energía de formación con el modelo desarrollado por Volobuyev (1964) es necesario contar con datos de radiación global a nivel de suelo, temperatura del aire y precipitación en valores medios anuales. La radiación solar global debe ser convertida a radiación neta mediante la ecuación 3.

$$Rn = Rg (1 - \alpha) + Re - Rs \quad [3]$$

Donde:

- Rg = radiación global a nivel del suelo en kcal cm⁻² año⁻¹ o kJ m⁻² año⁻¹ o W m⁻²
- α = albedo cuyo valor para praderas es 0,2 y para bosques 0,15
- Re = radiación de onda larga entrante que surge del producto entre la constante de Stefan Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴) y la cuarta potencia de la temperatura media anual del aire expresada en grados K
- Rs = radiación de onda larga saliente que surge del producto entre Re y el coeficiente de emisividad de la tierra medio anual (0,805)

La energía de formación se calcula mediante la ecuación 4:

$$Qfs = Rn * e^{-0,47 \left(\frac{Rn}{L*(P-S)} \right)} \quad [4]$$

Donde:

- Qfs = energía solar que anualmente participa en los procesos de formación del suelo o del mantenimiento de su organización pedológica (kcal cm⁻² año⁻¹ o kJ m⁻² año⁻¹)
- Rn = radiación solar neta media anual (kcal cm⁻² año⁻¹ o kJ m⁻² año⁻¹)
- L = calor latente de evaporación del agua (0,058 kcal cm⁻² mm⁻¹ o 2,51 kJ m⁻² mm⁻¹)
- P = precipitación media anual (mm año⁻¹)
- S = escurrimiento superficial medio anual (mm año⁻¹). Este parámetro puede desestimarse cuando se calcula Qfs en suelos de extensas planicies con pendientes menores al 1%

$$\frac{Rn}{L*(P-S)} = IHT \text{ (Índice Hidrotérmico Local), adimensional.}$$

Volobuyev (1974) encontró que la productividad primaria neta $Yppn$ (Mg ha⁻¹ año⁻¹) de la vegetación nativa se relaciona con la energía de formación de un suelo mediante la ecuación [5]:

$$Yppn = 0,1Qfs^{1,38} \text{ (} Qfs \text{ en kcal cm}^2 \text{ año}^{-1} \text{)} \quad [5]$$

A los efectos de aplicar esta metodología, se seleccionaron tres suelos zonales de la Argentina desarrollados a partir de material loésico: la Serie Churesky (Escolar, 1983), la Serie Marcos Juárez (Gorgas & Tassile, 2004) y la Serie Arizona (INTA, 1992). Para cada localización, se calculó la radiación neta a partir de la radiación global estimada por Grossi Gallegos (1998), la energía de formación y la productividad primaria neta. Las variables de cálculo y el resultado obtenido se exponen en la Tabla 1.

Los flujos de energía externa para cada sitio geográfico difieren particularmente en la lluvia media anual ya que la radiación neta es prácticamente similar para las tres localizaciones evaluadas. En tal sentido, la Serie Churesky es la que está sometida al mayor flujo anual de energía externa, seguida por la Serie Marcos Juárez y por último la Serie Arizona. Un mayor flujo de energía externa se corresponde con una mayor energía de formación y por ende una mayor intensidad de los procesos de adición, transformación, translocación y pérdidas durante la génesis.

A los efectos de analizar la relación entre la Qfs y algunas propiedades de los suelos, en la Tabla 2 se exponen los valores experimentales publicados en la bibliografía para el horizonte A de cada Serie: arcilla (Arc), materia orgánica total (MO), capacidad de intercambio catiónica (CIC), pH, saturación con bases (S), saturación

con calcio e índice de productividad (IP) de cada Serie (Riquier *et al.*, 1970).

La Serie Churesky, que es la de mayor Qfs , presenta un importante proceso de meteorización con formación de arcillas de baja CIC (65,3% de arcillas con una CIC de 24,3 meq 100 g⁻¹ de arcilla) y un intenso proceso de lixiviación de bases, proceso que es evidenciado por un pH ácido (4,5), baja saturación del coloide (41,5%) y baja saturación con Ca (24,5%). Estos procesos parecen tener una correlación positiva con la Qfs ya que se observa un menor contenido de arcilla y mayor nivel de saturación del coloide tanto para la Serie Marcos Juárez (25,1% de arcilla con un 89% de saturación) como para la Serie Arizona (6,2% de arcilla con un 87% de saturación del coloide). Es decir que: a mayor energía de formación más intenso son los procesos de transformación de minerales primarios a secundarios y más intensos son los procesos de migración interna de sustancias por lixiviación. Por otra parte, la energía de formación también influye en la génesis de las arcillas. Por ejemplo, se observa que para las series Marcos Juárez y Arizona las arcillas son de mayor CIC lo que estaría indicando que se formaron por procesos de herencia o transformaciones menores de los minerales primarios mientras que en la serie Churesky las arcillas se formaron a partir de procesos de neoformación, con formación de arcillas pobres en sílice.

Tabla 1. Temperatura, lluvia, radiación solar neta, energía de formación y productividad primaria neta para tres suelos de la Argentina.

Table 1. Temperature, rain, net solar radiation, formation energy and net primary productivity of three Argentine soils.

| Provincia | Subgrupo | Serie | Temp ¹ °C | Lluvia ¹ mm | Rad. Neta ² kcal cm ⁻² año ⁻¹ | Qfs ³ kcal cm ² año ⁻¹ | $Yppn$ ⁴ Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ |
|-----------|------------------|---------------|-------------------------|---------------------------|--|---|---|
| Misiones | Paleodult típico | Churesky | 20 | 1.400 | 117,9 | 60,3 | 28,6 |
| Córdoba | Argiudol típico | Marcos Juárez | 17 | 800 | 117,8 | 36,6 | 14,3 |
| San Luis | Haplustol éntico | Arizona | 14 | 450 | 117,7 | 14,7 | 4,1 |

¹ Valores medios anuales. ²⁻³⁻⁴ Valores obtenidos con las ecuaciones [3], [4] y [5], respectivamente.

Tabla 2. Propiedades del horizonte A e índice de productividad de tres suelos de la Argentina.

Table 2. Horizon A properties and productivity index for three Argentine soils.

| Serie | Arc % | MO % | CIC _{horizonte} meq 100 g ⁻¹ | pH en agua | S % | Ca ⁺⁺ % de S | CIC _{arcilla} meq 100 g ⁻¹ | IP |
|---------------|----------|---------|---|---------------|--------|----------------------------|---|----|
| Churesky | 65,3 | 4,2 | 26,4 | 4,5 | 41,5 | 24,5 | 24,3 | 50 |
| Marcos Juárez | 25,1 | 2,5 | 23,4 | 6,4 | 89 | 52,9 | 68,3 | 76 |
| Arizona | 6,2 | 1,24 | 8,8 | 6,5 | 87 | 65,6 | 91,2 | 24 |

El contenido de materia orgánica total refleja la actividad biológica de cada sistema. La Serie Churesky es la que presenta un mayor contenido de materia orgánica (4,2%) por tanto es la de mayor actividad biológica, seguida por Marcos Juárez (2,5) y finalmente Arizona (1,24%). Sin embargo, en la Serie Churesky dado el pH del horizonte, es probable la formación de humus ácido menos polimerizado y con un rápido ciclado de materiales con elevada mineralización en contraste con los otros humus de las Series Marcos Juárez y Arizona que son más polimerizados y estables por formarse en medios débilmente ácidos y ricos en calcio (Buol *et al.*, 1997).

En cuanto a la productividad primaria neta de la vegetación nativa, la mayor capacidad corresponde a la Serie Churesky por ser el suelo con mayor energía de formación, seguida por las Series Marcos Juárez y Arizona, respectivamente. Este parámetro, que también refleja la actividad biológica del sistema, debería corresponderse con una elevada capacidad productiva en términos utilitarios o con fines agropecuarios. Sin embargo, esto no es así: la Serie Marcos Juárez es la que presenta el mayor índice de productividad. Esta situación reside en el hecho de que suelos cuya Qfs es elevada (mayor a $50 \text{ kcal cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) comienzan a generar condiciones físicas, fisico-químicas y químicas no tan favorables para la producción de cultivos. Por otra parte, suelos con una Qfs bajas (menor a $20 \text{ kcal cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) las propiedades que definen la calidad productiva se resienten precisamente, por el escaso desarrollo de las mismas.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El modelo presentado permite valorar energéticamente los suelos estableciendo relaciones entre la energía dinamizada anualmente por el sistema y los procesos de génesis otorgando exclusiva relevancia del factor climático. Esta característica limita, por un lado, el campo de aplicación del mismo ya que puede ser utilizado en suelos con relieves planos, bien drenados y de materiales originarios de naturaleza física y química semejante. Por otro lado, el modelo tampoco explica la génesis de propiedades pedológicas que definen la capacidad productiva con fines utilitarios. Para ello hay que recurrir a relaciones cuantificables y estadísticamente significativas entre la energía de formación y dichas propiedades en suelos sin intervención humana, información difícilmente disponible. A ello hay que añadir la dificultad en contar con datos medidos de radiación solar y parámetros, como el albedo, situación que obliga a realizar estimaciones indirectas de los mismos. Otra limitante del modelo es que el mismo ha sido desarrollado para explicar la

pedogénesis de los sistemas suelos y no para determinar un estado o nivel energético de los mismos.

A pesar de las limitaciones indicadas, esta metodología es relativamente sencilla de resolver numéricamente, facilita el análisis de procesos claves que se desarrollan en los suelos vinculados al agua y carbono, posibilita cuantificar el gasto energético necesario para la dinámica de tales procesos y permite valorar la capacidad productiva en su estado natural. De este modo es factible aproximar una valoración energética global de cada sistema suelo y establecer comparaciones entre suelos naturales y en uso. También permite proyectar tendencias a largo plazo de las propiedades pedológicas por cambios en los flujos energéticos vinculados al factor climático.

En tal sentido, este método presenta un novedoso campo de investigación que permitiría a aportar nuevos elementos para estudiar distintas cuestiones en las ciencias del suelo: génesis, relaciones clima-suelo-planta, capacidad productiva o sustentabilidad del recurso. Por otra parte, contar con métodos de medición de procesos utilizando unidades de energía, permite integrar más fácilmente este campo del conocimiento con otras ciencias que estudian problemas ambientales o de provisión energética vinculadas a los procesos de desarrollo económico y social.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov por facilitar la bibliografía traducida del idioma ruso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aber, J & J Melillo. 1991. Terrestrial ecosystems. Saunders College Publishing, New York. 429 pp.
- Bockheim, J. 2005. Soil endemism and its relation to soil formation theory. *Geoderma* 129: 109-124.
- Bohn, H; B Mcneal & GO'Connor. 1993. Química de Suelos. Editorial Limusa. 370 pp.
- Bricchi, E & A Degioanni. 2006. El Sistema Suelo [1] Pp. 3-9. Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto (Ed.). El Sistema Suelo. Su origen y propiedades fundamentales. Argentina. 225 pp.
- Bricchi, E; A Degioanni & B Rosso. 2006. Evaluación energética de los suelos argentinos. XX Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. Salta. En actas pág. 504 y en CD.
- Brye, KR. 2004. Pedogenic interpretation of a loess-covered, pleistocene-glaciated toposequence using the energy model. *Soil Science* 169(4): 282-294.

- Buol, SW; FD Hole; RJ McCracken & RJ Southard. 1997. Soil Genesis and Classification. Iowa State University Press. 527 pp.
- Castillo Álvarez, M; I Nikolskii Gavrilov; CA Ortiz Solorio; H Vaquera Huerta, *et al.* 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia* 32(6): 365-365.
- Chadwick, OA & RC Graham. 2000. Pedogenic Processes [E] 41-76. Malcom E Sumner (*ed.*). Handbook of Soil Science. CRC Press.
- Contreras Benítez, JA; I Nikolskii; LA Acerves Navarro; R Arteaga Ramirez; M Escalona Maurice & DS Fernandez Reynoso. 2002. Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia* 36: 267-277.
- Escolar, EH. 1983. Los suelos y la vegetación del área de influencia de las obras de Yaciretá. Provincia de Corrientes. EEA INTA Corrientes. 45 pp.
- Gogichaishvili, GP & RV Maglakelidze. 2007. Biogeoenergetic description of soils in natural landscapes of Georgia. *Biology Bulletin* 34(1): 92-95.
- Gorgas, J & J Tassile (*ed.*). 2006. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000. Agencia Córdoba Ambiente e INTA EEA Manfredi. 512 pp.
- Grossi Gallegos, H. 1998. Evaluación de la radiación solar global a nivel de superficie empleando imágenes del satélite GOES 8. Tesis Doctoral. División Física, Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Luján.
- Hoosbeek, MR; RG Amundson & RS Bryant. 2000. Pedological Modeling [E] 77-116. Malcom E Sumner (*ed.*). Handbook of Soil Science. CRC Press.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina: Hoja Buena Esperanza. Provincia de San Luis. EEA San Luis.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York. 271 pp.
- Minasny, B; A McBratney & S Salvador-Blanes. 2008. Quantitative models for pedogenesis. A review. *Geoderma* 144: 140-157.
- Nikolskii Gavrilov, I; EO Bakhlaeva; JA Contreras Benítez & CV Ordaz. 2001. Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrothermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Sci* 35: 1031-1036.
- Odum, HT. 1971. Environment, Society and Power. John Wiley and Sons, New York. 331 pp.
- Odum, HT. 1996. Environmental accounting: energy and environmental decision making. J. Wiley & Sons 402 pp.
- Rasmussen, C; R Southard & W Horwath. 2005. Modeling energy inputs to predict pedogenic environments using regional environmental databases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1266-1274.
- Rasmussen, C & N Tabor. 2007. Applying a quantitative pedogenic energy model across a range of environmental gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(6): 1719-1729.
- Regan, EJ. 1977. The Natural Energy Basis for Soils and Urban Growth in Florida. MS Thesis. Gainesville, FL: University of Florida. USA. 176 pp.
- Riquier, J; DL Bramao & I Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. Mimeo N° AGL:TERS/70/6. FAO. Rome.
- Runge, E. 1973. Soil development sequences and energy models. *Soil Sci.* 115: 183-193.
- Schaetz, R & C Schwenner. 2006. An Application of the Runge "Energy Model" of soil development in Michigan's Upper Peninsula. *Soil Science* 171: 152-166.
- Schlesinger, WH. 1997. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. 2nd Ed. Academic Press. San Diego. 565 pp.
- Simonson, RW. 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 152-156.
- Smeck, N; E Runge & E Mackintosh. 1983. Dynamics and genetic modeling of soil systems. *In:* L Wilding; N Smeck & GF Hall (*eds*). Pedogenesis and Soil Taxonomy. Elsevier. Pp 51-81.
- Tetumo García, J; I Nikolskii Gavrilov; C Ortiz Solorio; L Tijerina Chávez & R Arteaga Ramírez. 2001. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia* 35(2): 137-147.
- Ugolini, FC & H Spaltenstein. 1992. The pedosphere. *In:* R Charlson; G Orions; S Butcher & G Wolf. (*ed.*) Global Biogeochemical Cycles. Academic Press. San Diego. CA. Pp 85-153.
- Volobuyev, VR. 1964. Energetics of soils formation [14] Pp 172-188. Ecology of soils. Academy of Sciences of the Azerbaijanian SSR. Institute of Soil Science and Agrochemistry. 225 pp. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Volobuyev, VR. 1974. Introducción a la energética de formación de suelos. Nauka Publ. Moscú. 127 pp. Traducido al español por I. Nikolskii Gavrilov, México.
- Zapata Hernández, R. 2006. Química de los procesos pedogénicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 357 pp.