

Retos y oportunidades de la ciencia del suelo: aprendiendo de los suelos, aprendiendo de la naturaleza

Challenges and opportunities in soil science: Learning from soils, learning from nature
Desafios e oportunidades na ciência do solo: a aprendizagem dos solos, aprendendo com a natureza

AUTHOR

Macías F.*
felipe.macias.
vazquez@usc.es

* Corresponding Author

Laboratorio de
Tecnología Ambiental
y Departamento de
Edafología y Química
Agrícola. Facultad de
Biología. Universidad
de Santiago de
Compostela. Avda.
Lope Gómez de Marzoa
s/n. Santiago de
Compostela. Spain.

Received: 09.03.2015 | Revised: 09.03.2015 | Accepted: 10.03.2015

RESUMEN

En un momento en el que se celebra el Año Internacional de los Suelos 2015, se hace una reflexión sobre la situación actual de la ciencia del suelo, los retos futuros de esta disciplina, como la eliminación del hambre, la mejora de la calidad de vida y el aumento del conocimiento científico de nuestro entorno, y algunas aportaciones recientes en la ciencia del suelo que ofrecen interesantes perspectivas.

ABSTRACT

As part of the celebration of 2015 as the International Year of Soils, a review of the current status of soil science is presented, in particular on the future challenges of this discipline, such as the fight against hunger, the improvement of quality of life, and the need for increasing scientific understanding of our environment. The most recent contributions of soil science offering interesting prospects are also presented.

RESUMO

Na altura em que se celebra o Ano Internacional dos Solos 2015, apresenta-se uma reflexão sobre a atual situação da ciência do solo, os futuros desafios neste domínio, como acabar com a fome, a melhoria da qualidade de vida e o aumento do conhecimento científico, e ainda sobre as recentes contribuições da ciência do solo que oferecem interessantes perspectivas.

DOI: 10.3232/SJSS.2015.V5.N1.01

1. ¿Dónde estamos y a dónde vamos en la ciencia del suelo?

La ciencia del suelo actual se desarrolla entre paradojas. A noticias alentadoras, tales como el reconocimiento por la 68 Asamblea de las Naciones Unidas del “*Día del Suelo*” (5 de diciembre) y del 2015 como “*Año Internacional de los Suelos*”, le sigue el abandono definitivo, en el 2014, del objetivo previsto por la Estrategia Europea de Protección del Suelo de llegar a una Directiva del Suelo y a un rango de consideración legislativa del suelo similar al de otros compartimentos biosféricos como el aire, el agua o la biodiversidad. Alemania, Reino Unido, Holanda y Austria han votado en contra de la elaboración de la Directiva de Suelos, y Francia se abstuvo, lo que llevó al abandono de la idea que se lanzó e ilusionó entre el 2002 y el 2006, pero que no llegó a fructificar a pesar de estar muy cerca en diferentes ocasiones.

Resulta difícil comprender cómo, habiendo reconocido la importancia de las “Funciones productivas y ambientales del suelo” (o los servicios ambientales) y la enorme magnitud de las múltiples “amenazas” que lo afectan, se haya llegado a esta situación de volver al punto de partida de la Estrategia (2002), al menos en la consideración legislativa. También resulta extraño que esta noticia haya sido saludada por la principal asociación de la PAC (la asociación de agricultores franceses) como una buena noticia, argumentando que la propia normativa derivada de la PAC ya era suficientemente controladora y no era deseable un incremento de la presión legislativa. Aunque es cierto que es deseable una disminución de la presión burocratizadora que lo invade todo, restando competitividad y capacidad de hacer, resulta extraña esta postura cuando la pérdida de eficacia productiva del suelo, por erosión, contaminación, huella de C, etc., en gran parte derivada de las actuaciones agrícolas, es tan evidente.

Tampoco son buenas las noticias sobre la evolución de la enseñanza de la ciencia del suelo en las universidades o la continua desaparición de la palabra “suelo” del nombre de multitud de departamentos universitarios y centros de investigación europeos, dentro de una línea de integración del suelo en conceptos más amplios, tales como producción agraria, producción silvícola, medio ambiente, ecosistemas, etc., pero que, en la práctica, difuminan la importancia y la necesidad de conocer el suelo. Así se ha llegado a la situación actual donde los suelos aparecen en muchos artículos, incluso en revistas de especialización en suelos, sin darles nombre (se analizaron dos suelos ¿?), muestréandolos por criterios de profundidad, pero sin tener en cuenta su organización y sin tener ningún interés en comprender su composición química y mineralógica, sus propiedades físicas, químicas y bióticas, o sus procesos y dinámica evolutiva dentro del marco definido por sus procesos y factores de formación.

Se aplican multitud de técnicas analíticas, se determinan los contaminantes, se proponen soluciones de mejora y técnicas de recuperación de los suelos por profesionales que ignoran, o no se interesan, por los fundamentos básicos de la ciencia del suelo en aras de una superespecialización que, aunque facilita la realización rápida de artículos y curriculum investigador, no permite alcanzar una visión holística del suelo. No permiten comprender la totalidad del suelo, sino aspectos muy parciales del mismo, desagregados y sin conexión. La consecuencia es que, junto a la comprensión, se pierde gran parte de la eficiencia

**PALABRAS
CLAVE**
Biosfera,
perspectivas de
la edafología,
Tecnosoles

KEY WORDS
Biosphere,
prospects for
pedology,
Technosols

**PALAVRAS-
CHAVE**
Biosfera,
perspetivas
em edafologia,
Tecnossolos

de actuar sobre él de forma coherente. Sería inimaginable que alguien que no conociera el cuerpo humano, su organización y su fisiología y bioquímica, operase a un paciente, pero eso es lo que ocurre cada vez con más frecuencia con los suelos.

El esquema integrado del estudio y comprensión del suelo, seguido por muchos autores clásicos, que va de los factores de formación a los componentes, propiedades, estructura u organización, procesos edafogenéticos, tipos de suelos, distribución paisajística, evolución en el tiempo, usos del suelo, y efectos degradativos y rehabilitadores de las actuaciones humanas, etc., es rara vez seguido en todas sus etapas, siendo lo más frecuente el estudio inconexo y muy parcial de algunas de ellos. Esto conduce a un incremento puntual de conocimiento de determinados aspectos, como los grupos funcionales de la materia orgánica, los sistemas enzimáticos o los procesos de adsorción de los coloides de carga variable, por citar algunos de los aspectos parciales que se han desarrollado en los últimos años.

Sin duda debe reconocerse la importancia que han tenido y tienen en la ciencia del suelo los nuevos enfoques que siempre han supuesto la aplicación de los métodos de estudio de otras ciencias a la comprensión del suelo. Como ciencia de tercera generación, la ciencia del suelo es claramente deudora tanto de la visión aportada por las ciencias básicas, como de las que de ellas fueron derivándose, pero también lo es de lo que suponen los nuevos avances en métodos y técnicas de estudio en las fronteras del conocimiento físico, químico, biológico, etc., o tecnológico, siendo la posibilidad de integrar los nuevos enfoques y la acreción de conocimientos uno de los aspectos definitorios de las ciencias que se han definido como “ciencias de aluvión”. Reconociendo la importancia de estos nuevos desarrollos y enfoques, que deben ser integrados, no por ello debemos perder de vista el objetivo central del estudio de la ciencia del suelo, que es el suelo en sí mismo. En este sentido la situación no es muy halagüeña. Cada vez se estudia menos el desarrollo completo del suelo, su historia y

su devenir dentro del contexto biogeoquímico, con los matices que introduce la influencia antrópica, lo que da origen a una pérdida de la visión holística del suelo y de todo lo que supone de incremento de la capacidad de comprensión de su realidad en un momento dado y de la capacidad que tenemos de actuar positivamente en su devenir, para aprovechar más racional y eficazmente todos sus recursos y posibilidades.

Y, sin embargo, la trascendencia del suelo es aparentemente reconocida. La FAO crea el Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos (GTIS), con sus 27 miembros actuales representativos de los diferentes continentes, para asesorar científica y técnicamente sobre los suelos a la “Alianza Mundial por el Suelo”, centrando sus objetivos en aspectos como:

1. Promocionar el manejo sostenible del recurso suelo para promover su protección, conservación y productividad durable.
2. Fomentar la inversión, la cooperación técnica, las políticas, la concienzación, educación, capacitación y la extensión sobre los suelos.
3. Establecer una plataforma común para guiar los estudios e investigaciones sobre el suelo. Abordar aspectos esenciales del uso del suelo relacionados con la demanda de alimentos y la adaptación y mitigación del cambio climático.
4. Mejorar la cantidad y la calidad de los datos e información edafológica: recolección de datos (generación), análisis, validación, presentación de informes, monitoreo y su integración con otras disciplinas.
5. Armonizar los métodos, medidas y los indicadores para el manejo sostenible y la protección del recurso suelo.
6. Establecer redes de conocimiento y colaboración para estudios integrales sobre el suelo y desarrollar directrices para establecer una gestión del suelo a nivel global.

Es decir, los retos que se plantean los orientadores de la estrategia de la FAO giran sobre dos aspectos básicos:

2. Los retos de siempre

a) La necesidad de garantizar la disponibilidad de alimentos para un mundo con un fuerte incremento de la población humana (nueve mil millones para el año 2050).

b) La necesidad de hacer compatible los anhelos de todas las poblaciones humanas de disponer de una mayor calidad de vida y acceso a los recursos, con la necesaria durabilidad de los mismos merced a un control de las principales huellas antrópicas: el control de las materias primas esenciales tanto para la producción de alimentos como las necesarias para la creación de infraestructuras, instrumentos, técnicas, etc., y el logro de minimización de la huella antrópica sobre el medio ambiente, en particular, la huella del agua y el forzamiento climático.

Los retos planteados son, en esencia, los mismos de siempre, los de toda la historia de la humanidad. Por una parte, eliminar el hambre y conseguir una mayor calidad de vida. Por otra, comprender el mundo que habitamos, la biosfera, respetando sus principios (Vernardsky 1945) y utilizando uno de los principales motores humanos: la curiosidad científica. Sólo que ahora ambos retos están agudizados por el incremento de la presión humana sobre el planeta, como lo demuestra todo el conjunto de relaciones neomalthusianas que se están estableciendo en los últimos siglos en relación a la población, tales como las relaciones entre PIB y población con la capacidad de producción de residuos, las de superficie deforestada y roturación de tierras con la población (Chesworth 2005), las que relacionan el colapso de civilizaciones con la mala utilización de los recursos y, en particular, de los recursos edáficos (Diamond 2006) o los efectos de la contaminación industrial y urbana relacionados con la búsqueda de nuevos materiales para la satisfacción de las necesidades humanas (Figura 1).

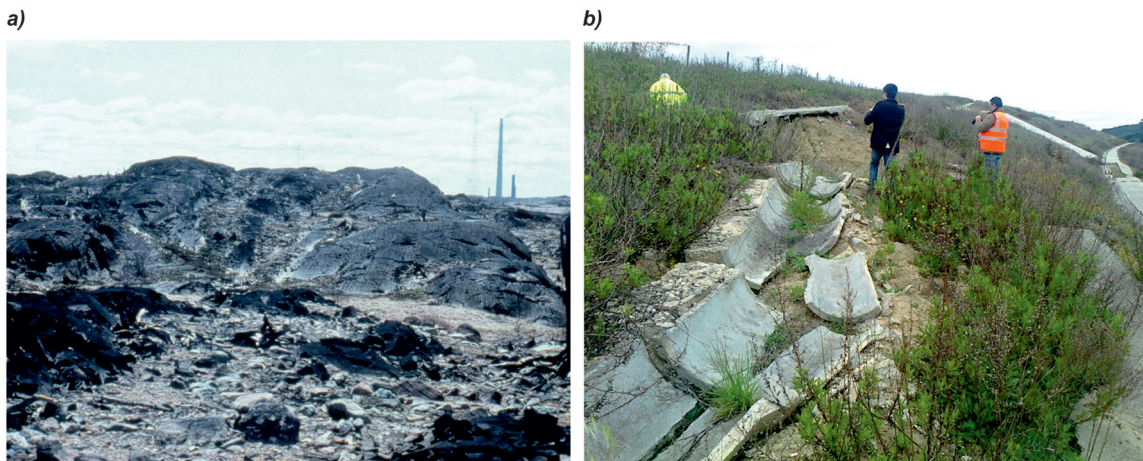


Figura 1. La contaminación de los suelos, aguas y ecosistemas por gases acidificantes, metales y metaloides tóxicos ha sido y es una consecuencia de una gestión inadecuada de los procesos mineros y la metalurgia. Otras actividades como las de ingeniería civil han producido importantes pérdidas económicas cuando no se conoce la resistencia de los suelos frente a los impactos o las propiedades derivadas de sus componentes. **a)** Efecto de lluvias ácidas y minería en Sudbury (Ontario, Canadá). **b)** Efecto de las arcillas hinchables en la estabilidad de infraestructuras viarias en los alrededores de Santarem (Portugal).

Para el logro de estos dos objetivos la FAO considera necesario “la mejora de nuestro conocimiento del suelo” y el establecimiento de modelos del tipo de los propuestos como “economías circulares”, que maximicen la valorización de todas las actividades que influyen sobre el planeta y sus recursos. Es decir, debemos conocer el suelo para aprovechar al máximo el recurso edáfico y climático que nos permite producir alimentos, garantizando la sostenibilidad de las condiciones y equilibrios ambientales que lo hacen posible. Al pilar básico de la visión agronómica y utilitaria del suelo debe integrarse la visión ambiental, algo que en Europa ya venía realizándose, pero que no aparece tan claramente en la ciencia del suelo de USA, Brasil o América Latina, claramente dominadas por el paradigma productivo.

Es verdad que ya se han hecho grandes avances en esta dirección integradora de las visiones agronómica y ambiental del suelo:

Se admite con normalidad que la mayor parte de las actividades humanas se realizan sobre suelo y que éste, además de producir alimentos y fibras, tiene un papel clave en aspectos tan importantes como el suministro de agua de calidad, el control de los contaminantes o ser el mayor sumidero de acción relativamente rápida contra el forzamiento climático, jugando además un papel clave en la urgente necesidad de incrementar la capacidad de adaptación a las modificaciones climáticas para reducir las pérdidas de biodiversidad.

Se reconoce que hay mucho que aprender de los mecanismos naturales del suelo que intentan oponerse al imperativo termodinámico que obliga a la rápida mineralización de los compuestos orgánicos, metaestabilizándolos en diferentes formas de humus que duran más de un siglo e incluso más de un milenio, siendo claros ejemplos de lo que se ha dado en llamar “carbono recalcitrante”, lo que abre la puerta a la mejora de la valorización y los sistemas de gestión de residuos en un contexto de forzamiento climático. De ahí que la visión del suelo como principal sumidero terrestre del C nos lleva tanto a la necesidad de recuperar lo perdido a lo largo de nuestra historia agronómica

(Lal et al. 1999; Lal 2001, 2004a, 2004b, 2008), como lo emitido por la fabricación de cemento y el consumo de combustibles fósiles. Soluciones tendientes a recuperar el C perdido, a través de nuevas tecnologías, como el cultivo sin laboreo, con laboreo mínimo, etc., están bien establecidas en diferentes países y la idea de reciclar en vez de quemar los residuos agrícolas, favorecer la humificación y generar formas de C más estables se han discutido, pero no siempre se han compartido. Frente a la idea de acumular más C en los suelos, algunos autores consideran, con cierta razón, que el C del suelo es útil precisamente cuando se descompone, suministrando energía a los microorganismos, de ahí que, aunque se reconoce el papel de sumidero y se pretende reforzarlo, aumentando el contenido de formas de C metaestable, también se admite que no todo el C del suelo puede ser recalcitrante, a pesar de que éste no es un C inerte, sino que interviene en aspectos clave como la retención de agua, las reacciones de cambio iónico y adsorción y, sobre todo, tiene un papel clave en la resistencia del suelo contra la erosión, pues los agregados que forma sólo son lentamente biodegradables.

En este sentido el avance ha sido importantísimo. Hace pocos años, sólo se hablaba del C del suelo, considerando que podía asimilarse al determinado mediante oxidación con dicromato en medio ácido. Fue la aportación de otras ciencias, en este caso las geológicas, las que pusieron en evidencia la existencia en muchos sedimentos de formas de C no o difícilmente oxidables, generando el concepto de “black carbon”, lo que llevó a determinar que, en algunos suelos, estas formas de C, recalcitrantes por su aromaticidad o su alto contenido de polímeros alifáticos (Almendros 2004), podían estar presentes en los suelos, especialmente cuando se habían quemado repetidamente. Hoy, la diversidad de formas de C que conocemos forma un continuo desde las más lábiles y respirables, incluso solubles en agua, a las más resistentes de los C torrefactados, pirolizados, los grafenos o los fullerenos, todo lo cual abre un extraordinario camino a las investigaciones sobre nanomateriales de estos compuestos y a sus múltiples aplicaciones industriales, filtros, catalizadores, etc.

3. El sueño de Wim, los Tecnosoles a la carta y otras aportaciones de la ciencia del suelo

La ciencia del suelo también realizó en este tema de las formas de C recalcitrantes una aportación clave, como es la de identificar que determinados tipos de suelos antrópicos contenían formas de C de alta estabilidad y que estas formas le aportaban unas características especiales a los suelos, además de su alto potencial como sumidero. Uno de estos suelos, sin duda el más citado, es el conjunto de suelos amazónicos conocido como "Terras pretas" que hoy sabemos aparecen no sólo en Brasil, sino en Guayana o Perú. Suelos que han sido generados por la actividad humana, muy

probablemente de forma inconsciente, pero que por sus extraordinarias propiedades de fertilidad y capacidad productiva dentro del contexto ferralítico tropical, han sido intensamente estudiados por autores como Sombroek, Glaser, Lehmann,... (Figura 2). De estos estudios han salido nuevos conceptos como el del "biochar" (Lehmann et al. 2003, 2006; Lehmann 2007; Lehmann and Joseph 2009) que lleva tras de sí multitud de nuevos trabajos científicos y tecnológicos en la última década, y, sobre todo, que fue capaz de inspirar a un edafólogo como Wim Sombroek la necesidad

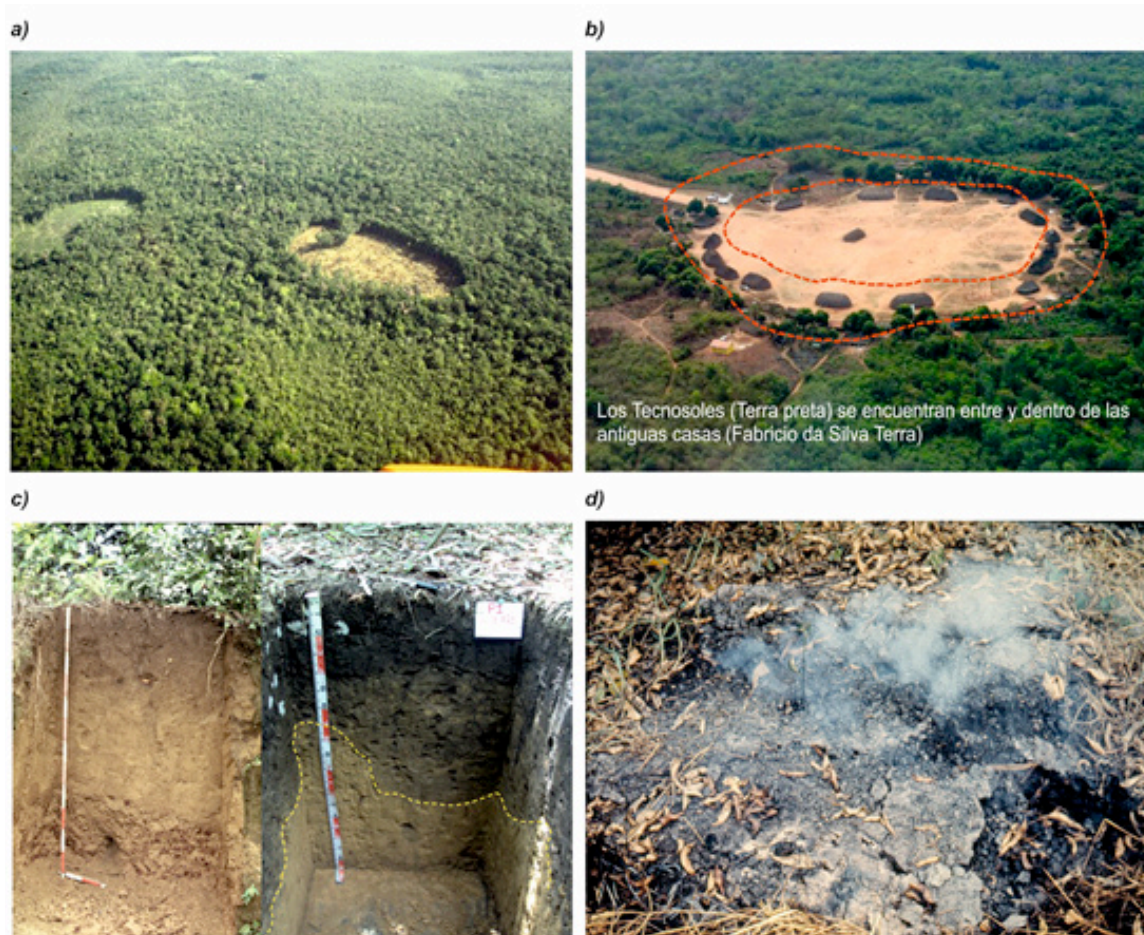


Figura 2. Las Terras pretas han sido intensamente estudiadas por edafólogos, arqueólogos, historiadores, etnólogos, etc. **a)** Ocupan del orden de un 1% de la superficie de la Amazonia, llegando con las Terras mulatas al 3%. Las primeras se forman en las zonas de vivienda **(b)**, las segundas en las zonas quemadas y posteriormente dedicadas al cultivo. **c)** El suelo ferralítico transformado en Terra preta modifica sustancialmente sus propiedades debido a la presencia de nuevos elementos y compuestos de origen antrópico. **d)** La autocombustión es un proceso pirolítico, con formación de compuestos aromáticos de elevada recalcitrancia, que se añaden a la metaestabilización por formación de complejos organometálicos y adsorción de compuestos húmicos sobre superficies oxídicas.

de reproducirlos, de hacerlos voluntariamente, siendo este el sueño (el sueño de Wim) de sus años finales de trabajo, **que los granjeros actuales de la Amazonía y de otros lugares del mundo pudieran crear ellos mismos su propia Terra preta: “Terra preta nova”, para ayudar a luchar contra la degradación del suelo y producir más alimentos.** El sueño no llegó a realizarse porque su autor murió dejando inconcluso el proyecto de hacer la Terra preta nova que, según sus palabras, recogidas por Charles C. Mann en el libro “Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek’s vision” (Woods et al. 2009), podría generar una **“Black revolution for the developing world’s soil”**.

Sin duda la numerosa bibliografía generada en torno a las “Terras pretas”, la importancia de sus derivados como sumidero de C a través del biochar y de las múltiples posibilidades que abre el estudio de los procesos pirolíticos en el tratamiento y valorización de residuos, la lucha contra el forzamiento climático, el incremento productivo o la creación de nuevos materiales capaces de retener contaminantes, entre otros aspectos, es un claro ejemplo de las múltiples interacciones que pueden desarrollarse tras un estudio profundo de un tipo de suelo, en este caso la Terra preta, que, sin embargo, ha sido producida por el hombre o a través de su intervención. Situaciones similares pueden establecerse con otros tipos de suelos antrópicos, como los “plaggen-soils”, los “historical maori soils”, los “concheiros con carbón vegetal de los indígenas fueguinos” o los “sambaquis de los manglares brasileños” (Figura 3), entre otros muchos ejemplos de suelos cuyos componentes principales derivan de residuos de animales y vegetales, mezclados con carbones vegetales que se han ido estructurando como consecuencia de la actuación de los procesos edafogenéticos sobre materiales antrópicos residuales a través del tiempo.

Más importante aún es la idea de que podemos resolver problemas de producción de alimentos y de sostenibilidad ambiental por medio de los suelos. No sólo por una buena gestión de los suelos, sino también por la posibilidad de hacerlos a medida de nuestras necesidades cuando el suelo natural ha desaparecido, se ha degradado o contaminado. Además, pueden

hacerse a través del reciclaje y la valorización de residuos, como en las Terras pretas, que, como algunos dicen no son más que “lixeiros”, con lo cual el ciclo se cierra, llevando del suelo a los alimentos, de estos a los residuos y de estos, a nuevos suelos que se integran en el ciclo biogeoquímico. En cierto modo, y recordando a las definiciones de los agrogeólogos alemanes del siglo XIX, el suelo no es más que *“piedra vieja, piedra podre y... en camino de ser nuevamente piedra”* (Friederich Albert Fallou, 1794-1877), o siguiendo esta idea pero con un concepto más actual que recoja las aportaciones de la biología y la organización, podríamos decir que el suelo es *“una mezcla estructurada de cadáveres de animales y vegetales con residuos de la alteración de las rocas y minerales, que buscan el equilibrio termodinámico en la superficie terrestre.* Así, también cumpliríamos con el objetivo de valorizar todos los residuos a través de procesos naturales, poniéndolos en el lugar adecuado y en la forma adecuada, que no es otra que su integración en el ciclo biogeoquímico con garantía sanitaria, reciclando todos sus elementos y componentes y aprovechando lo más eficientemente posible sus propiedades para lograr una mejora de la salud humana y de la protección de los ecosistemas.

Con estos conceptos se abren multitud de oportunidades a la ciencia del suelo en un camino integrador de producción de alimentos, gestión de residuos, conservación y elaboración de suelos cuando sean necesarios para la sostenibilidad ambiental, utilizando suelos como adsorbentes y como reactores que eliminan contaminantes (los orgánicos) o los inertizan, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad (los inorgánicos y algunos orgánicos). Conceptos como los “Tecnosoles a la carta” (Macías et al. 2007; Macías y Camps Arbestain 2010) (Figura 4) van en esta dirección, de la que puede ser un ejemplo el desarrollo del triángulo *Gestión de residuos-Sumidero de C- Lucha contra la contaminación*, que ha sido utilizado como fundamento de los procesos de recuperación de suelos con Tecnosoles o con sus precursores (Macías 2004; Macías et al. 2005), sin olvidar el importante papel de los organismos vivos, plantas, hongos, etc., en los procesos de recuperación ambiental (Figura 5).

Tecnosoles con Biocarbones

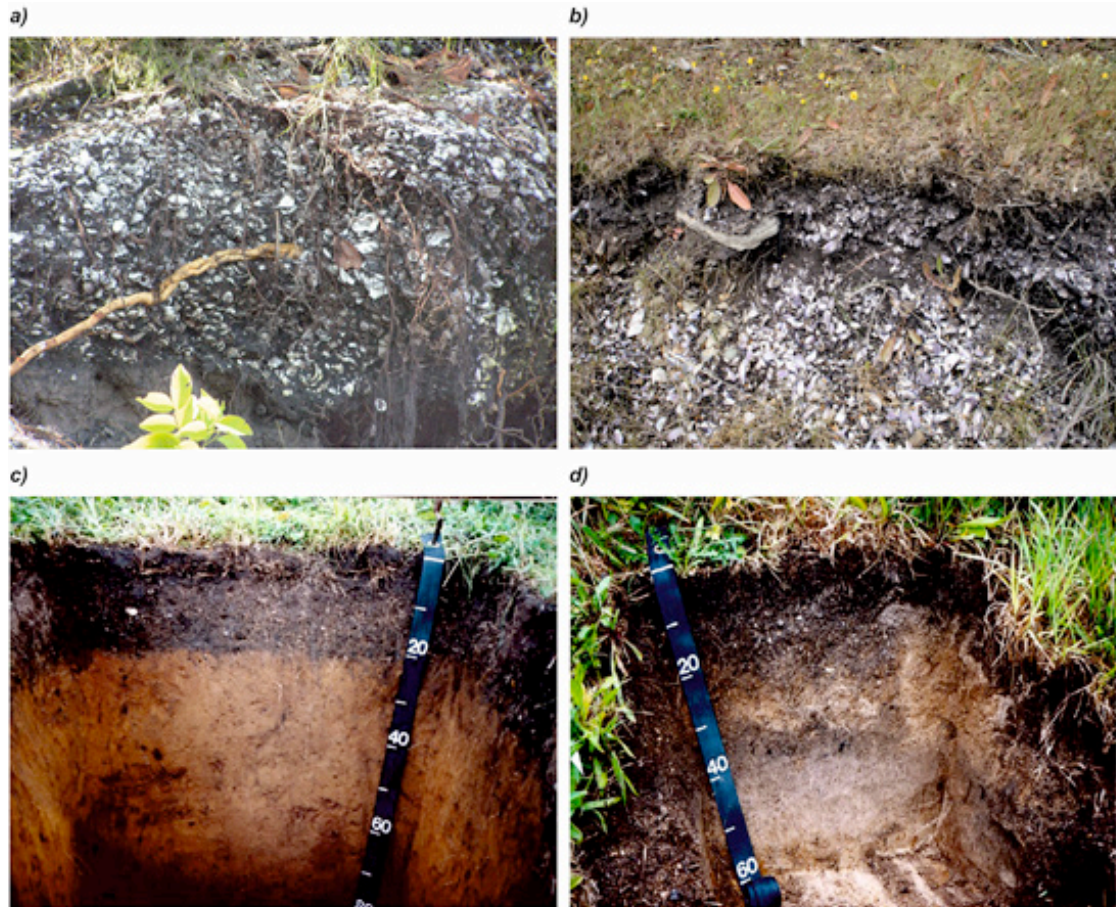


Figura 3. Otros Tecnosoles de origen antrópico llevan altos contenidos de formas de C vegetal con o sin carbonatos inorgánicos. **a)** Sambaquí en los manglares de Cananeia (Sao Paulo, Brasil). **b)** Concheiro producido por los indígenas fueguinos en el litoral del canal de Beagle (Tierra de Fuego, Argentina). **c)** y **d)** Suelos maoríes producidos para el cultivo del árbol del pan adicionando cenizas y restos carbonosos en los huecos de plantación (Nueva Zelanda, autora Camps Arbestain).



Figura 4. La mayor parte de los Tecnosoles proceden del abandono incontrolado de residuos industriales, urbanos, mineros, etc. En su mayor parte son nocivos ambientalmente por la presencia de elementos y compuestos potencialmente tóxicos en altas concentraciones. Sin embargo, pueden diseñarse, formularse y elaborarse Tecnosoles “a la carta”, con componentes, propiedades, estructura edáfica e incluso organismos deseados, que solucionen problemas ambientales o situaciones concretas de degradación o contaminación de suelos, aguas y ecosistemas.



Figura 5. La aplicación de los conocimientos edáficos y la interacción de vegetales y microorganismos adecuados con determinados compuestos puede acelerar los procesos de recuperación de residuos mineros. **a)** Inicio de la recuperación en cortas de explotación de la mina Touro. **b)** Estado de las mismas cortas 2 años después del extendido de Technosoles sambaqui y Technosoles ándicos. **c)** Technosol eutrófico sobre Technosol silándico, una combinación para neutralizar la acidez de las escombreras de la mina Touro y favorecer el desarrollo vegetativo. **d)** Estado de la escombrera 5 años después del extendido de los Technosoles. Además del crecimiento y diversidad de la vegetación, en las escombreras donde sólo vivían microorganismos extremófilos ahora crían perdiz, conejo, liebre, zorro, etc.

4. Aprendiendo de los suelos. Aprendiendo de la naturaleza

Otras aportaciones relativamente recientes en la ciencia del suelo también ofrecen interesantes perspectivas. Se reconoce la capacidad degradante del suelo para muchos contaminantes, y también la minimización de la biodisponibilidad y movilidad que ejerce sobre otros, la enorme biodiversidad todavía desconocida que existe en los suelos y el gran potencial que suponen los organismos del suelo y sus mecanismos enzimáticos. Se sabe que el suelo es el compartimento geoquímico que controla y regula los ciclos biogeoquímicos en la biosfera, siendo además el único que puede presentar una capacidad amortiguadora frente a los impactos de los cambios y contaminantes de cierta relevancia.

Tampoco se han olvidado ni tenemos totalmente resuelto el problema de mejorar la productividad. Quedan muchos problemas, como el de la disponibilidad de nuevas fuentes de P, primera materia prima cuyas fuentes de suministro actual con altas concentraciones se encuentra en entredicho, lo que obligará a la reutilización de formas de P ya utilizadas, residuales y de baja concentración, así como a la intensificación de la aplicación de los procesos biológicos que estimulan su captación y utilización por las plantas. Tenemos que reducir la huella ambiental de los abonos nitrogenados, para los que cuesta tanto energética y ambientalmente bajar el N del aire al suelo y de los que es preciso aprender a reciclarlo a través del suelo,

evitando, mitigando o retardando su devolución a la atmósfera. Los problemas de las deficiencias de oligoelementos, la necesidad de rejuvenecer suelos y nutrientes con rocas y minerales, tal como ha sido propuesto por los agrogeólogos, “convirtiendo las piedras en panes” (Chesworth et al. 1983), o la de incrementar la eficiencia de los procesos de producción de alimentos mediante biocatalizadores, organismos colaboradores, estimulantes, mejora genética, etc., son, entre otros, retos actuales de la ciencia del suelo que pueden llevar a ampliar las superficies de cultivo tradicionales, fuertemente afectadas por problemas de urbanización, sellado, salinidad, contaminación, etc. Tenemos que aprender a cultivar con menos huella sobre el agua, la biota y el aire, haciendo productivos suelos recuperados de las áreas degradadas, salinas, desérticas o climáticamente extremas. Habrá que incrementar la superficie cultivada mediante procesos de “polderización”, ganando suelos de cultivo al mar para producción de peces, crustáceos o vegetales, pero habrá que hacerlo manteniendo la calidad de los biomas claves como los manglares o las marismas, además de conservar la calidad y biodiversidad del medio marino y estuárico. Tendrán que utilizarse nuevas técnicas productivas que maximicen la eficiencia del agua, suelo y materias primas, pero habrá que hacerlo manteniendo la calidad de las aguas superficiales y freáticas, recuperando las ya afectadas, para lograr la simbiosis, o al menos la coexistencia entre nuestros objetivos y el mantenimiento de la calidad ambiental de la “capa crítica de la biosfera” en la que vivimos. Ningún sistema debe sobrepasar su “carga crítica” teniendo en cuenta los conocimientos disponibles de los suelos (Rodríguez-Lado et al. 2007), porque lo contaminemos o le pidamos más de lo que su capacidad puede dar, pero eso implica que debemos ampliar nuestro conocimiento de la variabilidad de sensibilidad, aptitudes y limitaciones de los suelos y de los efectos secundarios de nuestras actuaciones. Quedan muchos suelos por descubrir y siempre podemos profundizar en el conocimiento de nuestras numerosas lagunas en suelos poco conocidos como los que contienen horizontes sómbricos o los Nitisoles con alto contenido de formas de Fe extraíbles

con oxalato, los de ambientes extremos, etc., o los ya intensamente estudiados pero que guardan secretos en sus coloides orgánicos e inorgánicos, sus interacciones entre sí y con la biota microbiana y su actividad frente a los nuevos compuestos y especies químicas derivadas de la actividad humana.

Todo ello, y mucho más, debe desarrollarse y aplicarse, demostrando los científicos del suelo a la sociedad, y especialmente a sus dirigentes, que la ciencia del suelo es necesaria, y que puede dar pautas de aplicación y soluciones innovadoras y sostenibles para los retos crecientes de suministro de alimentos y fibras, y de mejora de la calidad ambiental que necesita la población mundial en crecimiento. Ese es el reto y la oportunidad para los edafólogos de hoy y de mañana. Ese debe ser el reto para seguir aprendiendo de los suelos y haciendo ciencia del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Almendros G. 2004. Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono. *Edafología* 11(2):229-248.
- Chesworth W. 2005. The Human Ecological Footprint. The Kenneth Hammond Lecture on Environment, Energy and Resources. University of Guelph.
- Chesworth W, Macías F, Acquaye D, Thompson E. 1983. *Agricultural Alchemy: Stones into Bread*. Episodes nº 1:3-7.
- Diamond J. 2006. *Colapso. ¿Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen?* Barcelona: Random House Mondadori, S.A.
- Lal R, editor. 2001. Soil Carbon sequestration and the Greenhouse effect. SSSA Special publication number 57. Madison: Soil Science Society of America.
- Lal R. 2004a. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627.
- Lal R. 2004b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22.
- Lal R. 2008. The role of soil organic matter in the global carbon cycle. Report on the Conference Climate change-can soil make a difference?; 2008 Jun 12; Brussels; [cited 2009 Aug 13]. Available from DIALOG: http://ec.europa.eu/environment/soil/conf_en.htm.
- Lal R, Kimble JM, Follet RF, Stewart BA. 1999. *The Potencial of U. S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse effect*. Chelsea, MI: Ann Arbor Press.
- Lehmann J. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447:143-144.
- Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitig. Adapt Strat Glob. Change* 11:403-427.
- Lehmann J, Joseph S, editors. 2009. *Biochar for environmental management*. Sterling: Earthscan Publications Ltd.
- Lehmann J, Kern D, Glaser B, Woods W. 2003. *Dark Earths. Origin, Properties, Management*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 505 p.
- Macías F. 2004. Recuperación de suelos degradados, reutilización de residuos y secuestro de carbono. Una alternativa integral de mejora de la calidad ambiental. *Recursos Rurais* 1:49-56.
- Macías F, Bao M, Macías-García F, Camps Arbestain M. 2007. Valorización biogeoquímica de residuos por medio de la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. *Aguas & Residuos* 5:12-25.
- Macías F, Camps Arbestain M. 2010. Soil carbon sequestration in a changing environment. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 15:511-529. doi 10.1007/s11027-010-9231-4.
- Macías F, Camps Arbestain M, Rodríguez Lado L. 2005. Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia. *Recursos Rurais* 1:71-85.
- Rodríguez-Lado L, Montanarella L, Macías F. 2007. Evaluation of the sensitivity of European soils to the deposition of acid compounds: Different approaches provide different results. *Water, Air and Soil Pollution* 185:293-303.
- Vernardsky VI. 1945. La Biosfera y la Noosfera. *American Scientist* 33(1):205-218.
- Woods WI, Teixeira WG, Lehmann J, Steiner C, WinklerPrins AMGA, Rebellato L, editors. 2009. *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Berlin: Springer. 502 p.