



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Una agricultura a la medida de cada suelo:
desde el conocimiento científico
y la experiencia práctica a los sistemas de
ayuda a la decisión

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

Diego de la Rosa Acosta

en el acto de recepción como académico numerario

el día 13 de mayo de 2013

y

contestación del académico numerario

Ilmo. Sr. D.

Guillermo Paneque Guerrero

UNA AGRICULTURA A LA MEDIDA DE CADA SUELO: DESDE EL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y LA EXPERIENCIA PRÁCTICA A LOS SISTEMAS DE AYUDA A LA DECISIÓN

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario,
celebrado el día 13 de Mayo de 2013.*

Excelentísimo Sr. Presidente de la RASC, Dignísimas Autoridades que presiden este Acto, Exmos. e Ilmos. Sres. Académicos, Señoras y Señores, queridos amigos:

Al iniciar este discurso deseo expresar mi mayor agradecimiento al Pleno de la Real Academia Sevillana de Ciencias por su benevolencia al haberme concedido este honor. En especial a los Excelentísimos Señores Académicos que me honraron al presentarmi candidatura y a aquellos que la apoyaron. Muy particularmente al académico D. Guillermo Paneque Guerrero que tuvo la iniciativa de proponerme para ello y por haber aceptado el encargo de la Academia de contestar este discurso. Esta distinción tiene para mí una especial significación ya que representa el reconocimiento de esta ilustre corporación a un científico profesional. Para los que nos dedicamos a tareas investigadoras en Sevilla creo que hay pocos honores comparables al de ser elegido Académico de la RASC. Soy consciente, no obstante, de que la distinción no puede dirigirse sólo a mí individualmente, sino que es extensiva a los muchos colaboradores que me han ayudado en mi trabajo investigador.

Doy las gracias porque la entrada en esta Real Corporación, en la que figuran tantos ilustres y prestigiosos maestros, me reportará múltiples provechos, sobre todo me enriqueceré con la amplitud de perspectivas científicas aquí representadas. El ser Académico de la RASC me llena pues de satisfacción, orgullo y agradecimiento, y espero no defraudar la confianza en mí depositada.

Con mis primeras palabras quiero expresar el mayor agradecimiento a mis padres, agricultores como sus antepasados, que me facilitaron todas las oportunidades para adquirir los conocimientos necesarios para afrontar mi vida profesional. Siempre les agradeceré lo mucho que se sacrificaron en nuestra formación, tanto la mía como la de mis nueve hermanos. Particularmente de la mano de mi padre me inicié en el respeto y la curiosidad por el mundo rural. Ya en el recuerdo, estoy seguro que un día como hoy sería inolvidable para ellos. También tengo mucho que agradecer a mi mujer, Maru, y a mis hijos, Juan, María y Diego, así como a mis hermanos, en especial Fernando y Miguel Angel, ambos catedráticos de la Universidad de Sevilla. Igualmente quiero enfatizar reafirmando mis raíces y recordando mi infancia rural en Pilas, pueblo del Aljarafe

sevillano en el entorno ya de Doñana, donde tanto aprendí y cuyos conocimientos tanto me han servido y acompañado durante toda mi vida.

A pesar de mi breve paso por la Universidad de Sevilla, Curso 1964-65, para hacer el Selectivo, tuve la fortuna de contar con un maestro excepcional D. Francisco González García, ya desaparecido, primer Presidente y Fundador de esta Academia. Sus clases magistrales y su fascinante personalidad me atraieron y determinaron mi vocación hacia el estudio y la investigación. Sin embargo, no tuve contacto de nuevo con D. Francisco hasta 1970, cuando terminé mis estudios de ingeniería en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, del llamado Plan-64. En la Escuela también conté con unos extraordinarios profesores, muy particularmente con D. Enrique Sánchez-Monge Parellada y D. César Gómez Campos, ambos también desaparecidos, y el primero de ellos Académico de Honor que fue de esta Real Academia. En aquel entonces, ellos lideraban un excepcional plantel de docentes que impartían la sólida formación que caracterizaba a los ingenieros agrónomos. Tengo que confesar que en mi formación profesional en Madrid, no solo tuvo que ver la Escuela sino también el Colegio Mayor San Agustín, donde recibí tanta ayuda, amistad y consejos, que me permitieron profundizar y ampliar los estudios.

No es mi intención detallar en este Acto mi trayectoria científica ni profesional, como tampoco lo es la exposición de un tema puntual de mi actividad investigadora. Por el contrario, este discurso reúne una serie de *reflexiones* sobre mi ya larga actividad investigadora en “evaluación de suelos: su uso y conservación”, así como algunas memorias y reconocimientos personales. Soy consciente de que esta mezcla de contenidos puede dar la sensación de un discurso no muy bien organizado, pero he dado preferencia a la amenidad de la exposición, considerando la diversidad de la audiencia en una ocasión como ésta. En síntesis, vengo a hacer una breve revisión de la generación de información, la captura de experiencia y la predicción científica en la Ciencia del Suelo, lo que está asociado de una manera muy directa con las tres vertientes de mi quehacer profesional: como científico, como agricultor y como ingeniero. Una combinación bastante particular y poco frecuente, que hace hincapié en los trabajos de laboratorio, campo y gabinete, respectivamente. Estas reflexiones son consecuencia de un proceso de maduración de cuarenta años, con resultados científicos en gran parte consecuencia de la sinergia propia de esa triple coincidencia. En este sentido y siguiendo al Profesor D. Javier Aracil¹, miembro también de esta Real Academia, me considero un ingeniero dedicado a hacer ciencia, concretamente ciencia agro-edafológica. Con ello se pone de manifiesto que mi actividad investigadora, como “trabajador del conocimiento”, no ha sido la de un científico convencional, sino que he desarrollado tareas en las que la ingeniería ha sido dominante con toda su carga de creatividad e imaginación. Además, las tareas actuales de agricultor en la finca heredada de mis padres me siguen facilitando el conocimiento real y detallado del mundo rural para combinar con el conocimiento teórico, persiguiendo finalmente la transferencia y explotación de los resultados científicos.

1. J. Aracil, *Fundamentos, Método e Historia de la Ingeniería*. Editorial Síntesis, 2011.

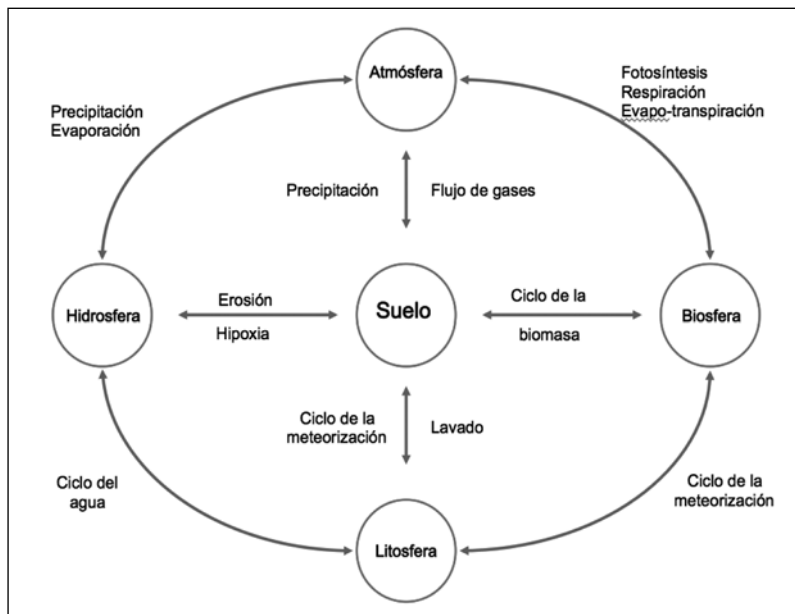
La temática científica sobre *uso y conservación de suelos* ha sido motivo preferente de mi trabajo, como Becario Fulbright en EEUU, Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Jefe del Servicio de Evaluación de Recursos Naturales de la Junta de Andalucía, Director del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS) y también como Director del Centro Temático de Suelos de la Agencia Europea de Medio Ambiente. Se trata de temas complejos cuyo tratamiento en profundidad no cabe en las pretensiones limitadas de este discurso. Aunque tales estudios los venimos tratando por mi grupo de investigación en numerosas publicaciones científicas y de divulgación, creo honestamente que este discurso no resultará una repetición de lo ya escrito. Además, el haber sido un investigador muy constante en el mismo campo de investigación, donde no se me han agotado las ideas para formular nuevos interrogantes ni me he dejado influir en demasía por las modas o por la fascinación y oportunismo de un determinado problema, no me ha permitido escoger otros temas sobre los que tuviese cierto conocimiento.

1. IMPORTANCIA DEL SUELO

Comencemos por resaltar la importancia del recurso natural suelo. El suelo es la piel que cubre el planeta Tierra, teniendo una influencia extraordinaria en todo lo que acontece sobre ella. Lo que a primera vista parece un simple material mineral relativamente homogéneo, contiene un increíble número de organismos vivos, además de cantidades variables de materia orgánica, aire y agua. La *vida terrestre* tiene lugar a través del desarrollo radicular de las plantas, mediante la retención y flujo del agua y los nutrientes; de legiones de animales microscópicos, tales como lombrices, hormigas, termitas, etc.; y de miles de millones de microorganismos, especialmente hongos y bacterias, responsables de innumerables transformaciones biogeoquímicas que abarcan desde la fijación del nitrógeno atmosférico hasta la descomposición de la materia orgánica. La gran mayoría de estos microbios en el suelo permanece aún sin descubrir, ya que no han sido nunca examinados, clasificados ni reconocido su significado ecológico. Dentro de esa compleja epidermis viva, y no fuera de ella, se encuentra pues la mayor parte de la biodiversidad terrestre. Se estima que una cuarta parte de todas las especies vivas de la Tierra tienen su hábitat en el suelo, llegando a alcanzar para una hectárea de pastizal un peso equivalente a 5 toneladas.

El suelo ocupa una situación singular con relación a los demás factores componentes del planeta Tierra, constituyendo la interfase entre *atmósfera*, *litosfera*, *hidrosfera* y *biosfera*. Es decir, las propias particularidades del suelo lo hacen único en la naturaleza, y sus funciones no se pueden aislar de las relaciones con la tierra, el aire, el agua y la vida (Figura 1). Como consecuencia de esta interdependencia, los suelos son muy diferentes de unos lugares a otros. Los suelos de tundra no se parecen nada a los de los trópicos, así como los suelos de las montañas difieren de los de las llanuras. Estos cambios tienen lugar incluso en distancias muy cortas, provocando una extraordinaria *variabilidad espacial* y pudiéndose decir que los suelos en el paisaje representan un enorme mosaico de infinitas teselas.

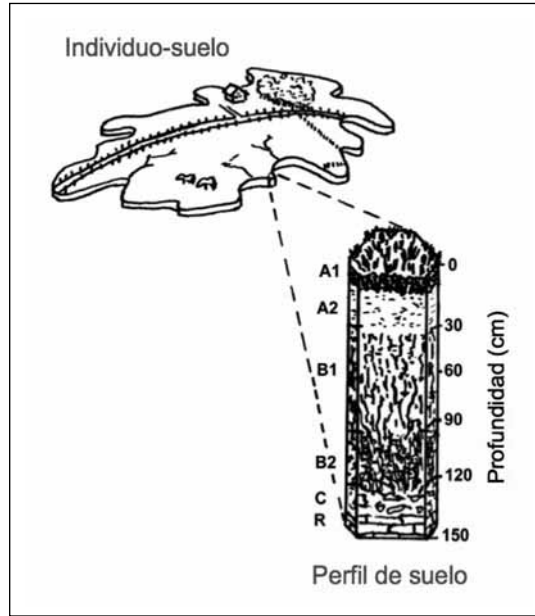
FIGURA 1
PROCESOS INTERACTIVOS DEL SISTEMA-SUELO



Desde el punto de vista de la Ciencia del Suelo, no todos los estudios científicos sobre los suelos pertenecen a esta disciplina. Para que así sea, dichos estudios se han de referir al individuo-suelo, representado por su *perfil vertical* o imagen tridimensional (Figura 2), o a cualquiera de sus tres señas o elementos identificadores: horizontes, agregados y coloides. A escala métrica, los *horizontes* del suelo de origen genético, y no simples capas geológicas superpuestas, se diferencian dentro del perfil vertical por su grado de desarrollo a lo largo del tiempo. Es por ello que el suelo se considera un recurso lentamente renovable o no-renovable, que precisa del orden de 1.000 años para generar un centímetro de espesor. A escala milimétrica, los *agregados* determinan la estructura como característica única y diferenciadora de los tipos de suelos, y su estudio conlleva el desarrollo de términos, conceptos y técnicas propios de esta ciencia. A escala nanométrica, los *coloides* del suelo están constituidos básicamente por las arcillas y la materia orgánica descompuesta. Estos materiales tienen una enorme importancia como componentes únicos del suelo, siendo responsables de numerosas propiedades, características y procesos que ocurren en los mismos; destacando la retención y lixiviación de nutrientes y contaminantes, que tanto tiene que ver con su grado de fertilidad y degradación. Este fascinante campo de investigación, con especial referencia a los minerales de la arcilla, quedó bien documentado en esta Academia por el Profesor Juan Cornejo en su Discurso de recepción como Académico “Arcillas: Del barro a la nanotecnología”².

2. J. Cornejo, *Arcillas: Del barro a la nanotecnología*. Discurso de Recepción, RASC. 2007.

FIGURA 2
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL INDIVIDUO-SUELO



De manera similar a como se hace con los animales y las plantas, los individuos-suelo se ordenan taxonómicamente siguiendo sistemas de clasificación natural, lo que facilita la correlación y el intercambio de información entre individuos. Debido fundamentalmente a su compleja biodiversidad, las funciones del suelo son múltiples, tanto desde el punto de vista ecológico como socio-económico. Dicha complejidad y *multi-funcionalidad del suelo*, unidas a la interdisciplinaridad, hacen que actualmente se de prioridad a su estudio global o holístico y se prefiera hablar del *sistema-suelo* mejor que de simplemente el suelo. Para no perder la perspectiva de globalidad de un sistema tan complejo, los métodos integrados de estudio del suelo no ignoran la conocida *Teoría General de Sistemas*³.

En cuanto a los beneficios o servicios ecosistémicos del suelo, destaca la función o capacidad para producir biomasa, que se encuentra íntimamente asociada con las mayores preocupaciones de nuestro tiempo: *seguridad alimentaria*, necesidades de agua y energía, balance de carbono y cambio climático. Sobre la importancia de la seguridad alimentaria solo cabe destacar que los 7.000 millones de habitantes actuales del planeta Tierra se incrementarán hasta 9.000 millones en el año 2050, y que ya se sobrepasan los 1.000 millones de hambrientos. Es por ello que FAO estima para ese horizonte del 2050, un incremento del 70% en la demanda mundial de alimentos, a la vez que una reducción del 12% de la producción como consecuencia del *cambio climático*. En cuan-

3. L. Von Bertalanffy. *General Systems Theory*. Inner process. 1968.

to al *balance de carbono*, el suelo desempeña una destacada función como sumidero terrestre. Después de los océanos, el suelo es el mayor almacén de carbono orgánico, cuatro veces superior a lo que almacenan las plantas. El *secuestro* o captura de carbono a la atmósfera que desarrollan los suelos, lo llevan a cabo fundamentalmente incorporando la biomasa generada por las plantas; en realidad, las plantas capturan y los suelos almacenan. En Europa, esa capacidad de almacenamiento de los suelos se estima en 70 mil millones de toneladas de CO₂. Además, el suelo facilita otros beneficios tales como transformación de sustancias que recibe, reserva de biodiversidad, soporte físico de infraestructuras (viviendas, industrias, carreteras, conducciones), fuente de materias primas (arcilla, grava, arena, yeso, caliza, turba) y mantenimiento del paisaje.

El suelo se vuelve particularmente frágil cuando se hace de él un mal uso. Una de las amenazas más graves es la *erosión* o pérdida superficial, que afecta a los horizontes más ricos en materia orgánica y que puede llegar a la completa desaparición del suelo. El escaso índice de formación edáfica hace que cualquier pérdida de suelo por erosión superior a una tonelada por hectárea y año se considere irreversible dentro de un período de 50 a 100 años. Solo en Europa, se considera que 115 millones de hectáreas están afectadas por erosión hídrica. Las principales causas de la erosión del suelo son las prácticas agrícolas inadecuadas, la deforestación, el sobrepastoreo, los incendios forestales y las actividades relacionadas con la construcción. La contaminación, cuando excede a la sorprendente capacidad de descomposición del suelo de compuestos orgánicos e inorgánicos, puede también llegar a degradar sus principales funciones y deteriorar el medio ambiente. También en Europa, se calcula que 0,5 millones de lugares están realmente contaminados y precisan de recuperación. Los contaminantes más frecuentes son los metales pesados, los aceites minerales y los compuestos agro-químicos. La *salinización* del suelo suele ser consecuencia del uso de agua de riego rica en sales y/o malas condiciones de drenaje. Alrededor de 3,8 millones de hectáreas de suelos europeos están afectados por la acumulación de sales solubles. Unos elevados niveles de sal en el suelo degradan ciertas funciones edáficas, limitan su potencial agrícola y representan una considerable amenaza ecológica. Igualmente, la *compactación* del subsuelo por el uso reiterado de maquinaria pesada puede ser una grave amenaza para el buen funcionamiento del suelo. El 35% de los suelos europeos, principalmente los de clima más húmedo, presentan un grave riesgo de ser compactados. La degradación más drástica del suelo es su sellado o recubrimiento por edificios e infraestructuras, hecho bien frecuente en los países industrializados. En la Unión Europea, la extensión de suelo cubierta por materiales impermeables alcanza el 9% del total. Una vez cubierto por hormigón o alquitrán, el suelo es incapaz de desarrollar cualquiera de sus funciones.

En España, con sus 50,5 millones de hectáreas, la ocupación o uso actual del suelo de acuerdo con el tercer y último inventario Corine⁴ se distribuye de la siguiente forma. El 2 % (más de 1 millón de hectáreas) de la superficie terrestre total corresponde a superficies artificiales (tejido urbano, zonas industriales, redes viarias, escombreras

4. MARM. *Perfil Ambiental de España: Informe basado en indicadores*. Ministerio de Medio Ambiente. 2010.

y vertederos, etc.). En los últimos años, estas superficies artificiales han aumentado considerablemente, dominando la *expansión urbana*. La *superficie total agraria*, incluyendo tierras de cultivo y pastos, ronda los 20 millones de hectáreas, lo que equivale al 41 % del territorio. Y la superficie forestal, ocupada por bosques y otras formaciones forestales, está próxima a los 28 millones de hectáreas (57 % del total), con una ligera tendencia a la *deforestación*. Además, sobre esta distribución de grandes tipos de ocupación del suelo, se superpone el número de *espacios naturales protegidos*, que en 2009 ascendía a 1.519 representando casi el 12 % (5,7 millones de hectáreas) de la superficie terrestre total de España.

En la Unión Europea (UE-27), que cuenta con alrededor de 400 millones de hectáreas y cerca de 500 millones de habitantes, tiene una *superficie total agraria* del 42% del territorio. Sin embargo, actualmente, no está en situación de garantizar la seguridad alimentaria de la población, pues para alimentar a esa población la UE necesita la producción adicional de 35 millones de hectáreas de suelo fértil fuera de su territorio. Esto unido al aumento de la demanda mundial de alimentos se requerirá, no solo de una mayor extensión de tierras agrícolas, sino también de más eficiencia en la producción de cosechas. En Europa, la tendencia actual es que las zonas agrícolas disminuyen, aunque su gestión se intensifica; concentrándose la producción agrícola en los suelos más fértiles, mientras que las tierras agrícolas marginales están siendo abandonadas⁵.

En resumen, la compleja constitución y variabilidad del suelo, así como la multifuncionalidad e interdisciplinaridad, proporcionan a su estudio un gran interés científico, razón de ser de la Edafología o Ciencia del Suelo. Por otra parte, el reconocimiento de que el suelo sea un elemento básico de la riqueza nacional de un país le da a su vez una extraordinaria importancia técnica. Sobre el suelo inciden multitud de títulos jurídicos cuyo objetivo es su correcta explotación y conservación, destacando a nivel de la Unión Europea la Estrategia de Protección de Suelos. Sin embargo la percepción sobre el suelo que tienen los ciudadanos en general, y no digamos la preocupación por su buen uso y protección, es relativamente muy escasa. En muchos lugares, el suelo está siendo sobreexplotado, degradado e irreversiblemente perdido como consecuencia de las actividades del hombre, determinando su sellado, contaminación, erosión y pérdida de la materia orgánica. Recientemente, son destacables algunas iniciativas para llamar la atención al público en general sobre la importancia del suelo. Por ejemplo en Alemania, la Sociedad Germana de la Ciencia del Suelo lleva varios años lanzando la campaña sobre “El suelo del año”, habiendo sido ya se leccionados distintos suelos, uno por cada año, tales como el “Chernozem”, “Podzol”, “Arenosol” y “Vega”. El año 2005, las Naciones Unidas declararon el 5 de Diciembre como “*World Soil Day*”.

5. EEA. *Assessing Biodiversity in Europe: The 2010 report*. European Environment Agency. 2011.

2. SABER HISTÓRICO

Además de los aspectos reseñados sobre la importancia del suelo, creo que resulta igualmente interesante destacar ciertos hitos históricos sobre su estudio. Desde la antigüedad, el conocimiento general sobre los suelos ha seguido muy estrechamente la historia de su utilización para cultivar plantas y hacer agricultura. Sin lugar a dudas, el desarrollo de la agricultura ha sido la revolución más importante para la historia de la Humanidad, al olvidarse el hombre de las hambrunas y de la dependencia de encontrar alimentos. Sin tratar de hacer una exhaustiva revisión histórica, se pueden destacar desde la antigüedad los siguientes hechos.

En Mesopotamia, entre los ríos Tigris y Eufrates, el actual Iraq, y alrededor de 10.000 años antes de Cristo (aC), se sitúan los primeros testimonios sobre prácticas agrícolas realizadas por el hombre. A partir de este origen, parece que la agricultura se fue expandiendo al tiempo que las lenguas indoeuropeas. Durante las civilizaciones Sumeria y Babilónica, hasta los años 1000 a.C., la agricultura se desarrolló considerablemente, llegándose a diferenciar los suelos por su fertilidad natural y aptitud para introducir el riego que llegó a ser muy perfeccionado mediante ingeniosos sistemas de canales.

Desde el segundo milenio aC, los Griegos que fueron excelentes observadores de la naturaleza, a través de sus mejores filósofos, tales como Aristóteles y Platón, desarrollaron tratados donde mostraban el conocimiento sobre las propiedades de los suelos, llegando a establecer el concepto de perfil del suelo integrado por diferentes horizontes o capas, y a reconocer que el propio suelo suministraba nutrientes a las plantas. La erosión del suelo en la Antigua Grecia constituyó un serio problema, llegando a ser también ampliamente documentada. Como en tantos otros saberes, el conocimiento de los suelos desarrollado por los Romanos fue una continuación del llevado a cabo por los Griegos. Desde el siglo II aC, Catón, Varrón, Plinio y otros proclamaron la agricultura como una ciencia, considerando el suelo como uno de sus principales componentes. Desarrollaron un sistema de clasificación de los suelos de Italia y ampliaron los conocimientos ya existentes sobre la fertilidad y la manera, no siempre concordante entre estos autores, de mantenerla y recuperarla. El agrónomo hispanoromano Lucius J. M. Columela (Siglo I) en su obra escrita *Res Rustica* hace una detallada descripción de los tipos de suelos y las labores agrícolas referidas principalmente al cultivo de cereales y de la vid, en la región de la Bética. Columela rechaza la teoría de la creciente esterilidad del suelo por el continuado uso agrícola, defendida por otros escritores de su época, proclamando que el suelo no envejece siempre que se le facilite los nutrientes necesarios para el cultivo.

Otras civilizaciones mediterráneas aC, tales como la Egiptia, Fenicia o Cartaginense, estuvieron también muy relacionadas al suelo, aunque no lograron el nivel de conocimiento de Griegos y Romanos. La enigmática civilización egipcia consiguió importantes descubrimientos sobre los suelos inundados por las crecidas del río Nilo, su uso agrícola y eliminación de las sales acumuladas. En China, desde el segundo milenio aC, empezaron a conocer los suelos para hacer agricultura, destacando el calendario agrícola utilizado, la clasificación de los suelos y la relación de tiempos óptimos para

realizar las distintas labores. En América, desde el siglo V aC, la civilización Maya desarrolló una detallada clasificación de los suelos de México que los indígenas utilizaban para llevar a cabo una verdadera agricultura de precisión en pequeñas parcelas. También los Incas del Perú fueron especialistas en la construcción de terrazas en zonas de montaña que luego rellenaban hasta un metro de espesor con suelos fértiles generalmente cenizas volcánicas.

Para las sociedades occidentales, la Edad Media representó un período de retroceso y pérdida del conocimiento acumulado por las civilizaciones anteriores, especialmente la Griega y la Romana. Sin embargo el conocimiento de los suelos se mantuvo e incluso se incrementó en algunos lugares. Después del saqueo de Roma, en el año 410, la cultura romana se desplazó a Bizancio, lo que permitió a los Bizantinos progresar durante el siguiente milenio. Así en el siglo X apareció la *“Enciclopedia Agrícola”* que recogía la descripción de los suelos del Imperio Bizantino, los estudios sobre los cultivos más apropiados para diferentes suelos, así como las distintas formas de evaluar la calidad del suelo. Destacó en aquel entonces, también en el siglo X, la escuela islámica de Córdoba que elaboró un *Calendario Agrícola*, relacionando entre otros aspectos las tareas mensuales necesarias de preparación del suelo para la agricultura. Como relató el geógrafo hispanomusulmán Abú M. Al-Idrisi (1100-1165), se reconocía también que los diferentes cultivos tenían distintos requerimientos en cuanto a fertilidad del suelo.

Al igual que para otras ciencias, se suele decir que la Ciencia del Suelo tiene una larga prehistoria y una breve historia. En otras palabras, que sus raíces son muy antiguas, aunque su reconocimiento como disciplina científica sea relativamente reciente.

3. CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

Dediquemos ahora unos minutos a profundizar en el conocimiento realmente científico de los suelos. A partir del siglo XVI, con el Renacimiento en Europa, la Ciencia comenzó un desarrollo creciente. En general, se puede decir que la ciencia moderna se inicia con la utilización de la capacidad representativa de las matemáticas, siendo Galileo Galilei (1564-1642), Johannes Kepler (1571-1630) y posteriormente Isaac Newton (1642-1727) los pioneros en este esfuerzo. También René Descartes (1596- 1650), además de padre de la filosofía moderna, es considerado uno de los nombres más destacados de la Revolución Científica.

En esos inicios, ocurrieron también destacados acontecimientos con relación al *conocimiento científico* de los suelos. Aunque sin llegar a identificarse como un campo científico independiente, muchos de los fenómenos que ocurren en los suelos fueron individualmente investigados. Así, aparecieron las primeras hipótesis sobre la nutrición de las plantas, identificándose el nitrógeno como un importante nutriente de las plantas en el suelo, y pudiéndose establecer el inicio de la química del suelo. Es de destacar en este tiempo el tratado sobre *“Agricultura General”* del español Gabriel Alonso de Herrera (1470-1539), que basada en los estudios de Columela desempeñó un papel fundamental en la agricultura europea, introduciendo aspectos destacados sobre la calidad

de los suelos. El artista, pensador e ingeniero Leonardo da Vinci (1452-1519) propuso la idea de que los suelos se formaban, al menos parcialmente, por la descomposición de las plantas. Ya más recientemente, el biólogo inglés Charles R. Darwin (1809-1882), bien conocido por sus teorías sobre la evolución de las especies, desarrolló el concepto multihorizonte del perfil del suelo al estudiar el hábitat de la lombriz de tierra. También, el prestigioso investigador francés Louis Pasteur (1822-1895) lanzó la hipótesis de que la nitrificación en los suelos ocurría por oxidación microbiana, mucho antes que ello fuese experimentalmente confirmado. Todos estos insignes pensadores que hacen especial hincapié en estudios referidos a la *biología de suelos*, fueron posteriormente seguidos por otros pioneros microbiólogos, tales como los alemanes T. Schloßing y A. Muntz y los holandeses Winogradsky y Martinus Beijerinck. En la actualidad, la investigación en biología de suelos ha progresado sobremanera en la fijación biológica del nitrógeno atmosférico, en la distribución de organismos vivos dentro del propio suelo, y en la bioremediación de suelos contaminados.

De la mayor importancia en los inicios de la moderna Ciencia del Suelo fueron los trabajos del químico alemán Justus von Liebig (1803-1873), por los que se supo que las plantas necesitaban que el suelo contuviera los tres nutrientes básicos, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en forma fácilmente asimilable, para poder construir sus tejidos. Esta teoría de la nutrición mineral de las plantas, trascendental en la química de suelos, contribuyó a imponer definitivamente el concepto del “humus” como fuente de dichos nutrientes. A su vez, la “ley del mínimo de Liebig: el nutriente que se encuentra menos disponible es el que limita la producción”, fue posteriormente expresada en forma matemática por Eilhard Mitscherlich (1794-1863) con la famosa ecuación:

$$Y = A(1 - e^{-cX}) \quad [1]$$

que describe el rendimiento de un cultivo (Y) en función de un elemento nutritivo del suelo (X). Además de Liebig, los científicos ingleses J. Lawes, J. Gilbert y J. Way jugaron un papel destacado en la consolidación de esta sub-disciplina de química de suelos, así como de la química agrícola.

En cuanto al aspecto físico de los suelos, es también destacable la aportación del ingeniero francés Henry Darcy (1803-1858) formulando la ley que lleva su nombre a partir de un estudio sobre el flujo del agua a través de filtros de arena, y que aún hoy es elemento clave en la física de suelos. Dentro de esta sub-disciplina, los trabajos del ingeniero sueco Albert Atterberg (1846-1932) sobre plasticidad de los suelos representaron también un hito destacable. Aunque estos primeros estudios hacían referencia a verdaderos aspectos físicos, con relación al agua, aire o temperatura del suelo y sus condicionantes meteorológicos, fueron posteriormente derivando hacia temas más propios de la fisiología de plantas o ecología. En la actualidad, la investigación sobre *fertilidad física y química* del suelo va dirigida básicamente a controlar los factores que afectan la disponibilidad de agua y nutrientes para los cultivos, así como a explicar el ciclo de los nutrientes en los agro-ecosistemas, y a incrementar la eficiencia en el uso de los fertilizantes.

La *mineralogía de suelos* como sub-disciplina de la Ciencia del Suelo, y con especial referencia al material de la fracción más fina o arcilla, fue tomando cuerpo ya bien entrado el siglo XX con la aplicación de la nueva técnica instrumental de difracción de rayos X. Así, el químico sueco Sante Mattson (1886-1980) llevó a cabo un estudio pionero sobre el comportamiento de los coloides del suelo. En este progreso científico, como en tantas otras disciplinas, ha jugado un papel esencial otras poderosas técnicas y herramientas disponibles, tales como el microscopio electrónico, la resonancia magnética nuclear o la espectroscopía atómica.

Siguiendo este análisis histórico de la Ciencia del Suelo, de acuerdo con sus principales campos de estudio o clásicas sub-disciplinas: química de suelos, física de suelos, biología de suelos y mineralogía de suelos, nos quedan los estudios que mejor se acercan al conocimiento holístico o global del suelo y que están más relacionados con el tema central de este discurso. Estos estudios científicos que integran la sub-disciplina de *reconocimiento y evaluación de suelos* y que se realizan tanto en campo como en laboratorio, se iniciaron por el ruso Vasily V. Dokuchaev (1846-1903), a quien se considera el padre de la nueva Ciencia del Suelo. Dokuchaev definió el suelo como un cuerpo natural independiente, identificando sus cinco factores formadores: clima, material original, organismos vivos, topografía y tiempo. En EEUU, a principios del siglo XX, fue Curtis F. Marbut (1863-1935) quien presentó en el I Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo (Washington DC) su “*Schema for Soil Classification*”, desarrollando una síntesis con las ideas de la escuela rusa, los trabajos de Glinka, Hilgard, Coffey y Whiney y la amplia perspectiva conseguida con su propio trabajo⁶. En ese mismo Congreso, E. John Russell (1872-1965), entonces director de la famosa “Rothamsted Experimental Station”, expuso su visión especialmente microbiológica del suelo que ya había desarrollado en su obra “*Soil Conditions and Plant Growth*”⁷.

En 1935 se creó el “Soil Conservation Service (SCS)”, dentro del Departamento de Agricultura de EEUU (USDA), para llevar a cabo el reconocimiento detallado de los suelos de mayor interés agrícola que se fueron plasmando en *mapas de suelos*. C. F. Marbut, H.H. Bennett y C. Kellogg al frente del USDA-SCS impulsaron esta sistemática tarea, que se ha prolongado hasta nuestros días, consiguiendo una extraordinaria serie de mapas semidetallados de suelos, escala 1/20.000, a nivel de la casi totalidad de los condados de EEUU. El “*Soil Survey Manual*”⁸ recoge los procedimientos metodológicos seguidos en la elaboración de estos mapas, que han sido internacionalmente aceptados y ampliamente utilizados. Finalmente, las aportaciones de G. D. Smith recogidas en la publicación “*Soil Taxonomy*”⁹ completan los procedimientos metodológicos, tanto de campo como de laboratorio, para desarrollar los reconocimientos de suelos.

En la *clasificación natural* o sistemática de los suelos, parte esencial del reconocimiento o cartografía, la Edafología ha seguido en general un camino parecido al de la Botánica y la Zoología. Se suele utilizar el sistema de nomenclatura binaria de Linneo,

6. C.F. Marbut. *A Scheme for Soil Classification*. ISSS. 1927.

7. E.J. Russell. *Soil Conditions and Plant Growth*. Longmans Green & Co. 1915.

8. USDA. *Soil Survey Manual*. Agricultural Handbook. 1951.

9. USDA. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification*. Agricultural Handbook. 1975.

sustantivo más adjetivo, aunque no en lengua latina y si mediante la adición de prefijos. También, para una caracterización más detallada se añaden nuevos adjetivos. Los sistemas de clasificación de suelos más utilizados son los siguientes.

Las *Claves Sistemáticas de Kubierna*¹⁰ representan la primera clasificación moderna de suelos, destacando los caracteres diferenciadores morfológicos, físicos, químicos y micromorfológicos. Se trata de una clasificación muy didáctica, donde las clases van desde los suelos poco evolucionados a los de mayor evolución, estableciendo tres grandes divisiones: suelos subacuáticos, semiterrestres y terrestres. Con especial referencia a los suelos europeos, las diferentes clases se encuentran minuciosamente descritas y espléndidamente ilustradas como se refleja en la extraordinaria “*Colección de Acuarelas*”. Walter L. Kubierna (1897-1970) que conoció muy bien los suelos europeos, y particularmente los españoles, llegó a decir que excluyendo los suelos tropicales, existe en el mundo un número relativamente pequeño de suelos que no se encuentren de alguna forma en Europa. Se trata de una clasificación que *marcó un hito en su tiempo aunque hoy ha quedado obsoleta*. (Ej.: Rotlehm decolorado). Una adaptación del sistema de Kubierna de clasificación de suelos fue la Clasificación Francesa¹¹, siguiendo unas bases más detalladas. Hoy se puede considerar también en desuso. (Ej.: *Suelo vértico litomorfo*).

El prototipo de las modernas clasificaciones de suelos es la americana “*Soil Taxonomy*”¹², con bases morfométricas sobre propiedades medibles tanto en campo como en el laboratorio. Introduce los horizontes de diagnóstico como criterio fundamental de diferenciación, y amplía al máximo las propiedades edafológicas a considerar como las referidas a la arena, la arcilla, la micromorfología o el edafoclima. (Ej.: *Calcixerollic Xerochrept*). Otro estándar en clasificaciones modernas es el “*World Reference Base for Soil Resources*”¹³, que surgió como iniciativa de FAO de conseguir un sistema universalmente aceptado, y para ser utilizado en la revisión de la leyenda del *Mapa de Suelos del Mundo* a escala 1/5.000.000¹⁴. Como el sistema “*Soil Taxonomy*” se basa en horizontes de diagnóstico relacionados con los procesos de formación del suelo. (Ej.: Calcic Luvisol).

Al igual que tantas otras ramas del saber, la Ciencia del Suelo se ha ido haciendo también cada vez más cuantitativa. Como iniciador de ese proceso de cuantificación, Hans Jenny (1899-1992) en su libro “*Factors of Soil Formation*”¹⁵ considera el suelo como un sistema cuyo estado puede ser definido por la acción combinada de una serie de variables. El estado de formación del suelo (*S*) se explica por la siguiente función:

$$S = f(c, m, r, o, t) \quad [2]$$

donde *c* es el factor clima, *m* el material original, *r* el relieve, *o* los organismos vivos, y *t* el tiempo. Mediante esta expresión matemática, la formación de un nuevo suelo se

10. W. Kubierna. *Claves Sistemáticas de Suelos de Europa*. CSIC. 1952.

11. Ph. Duchaphour. *Pedologie: Pedongenese et classification*. Masson. 1967.

12. USDA. *Keys to Soil Taxonomy*. 11th ed. Soil Survey Staff. 2010.

13. FAO-ISRIC-ISSS. *World Reference Base for Soil Resources (WRB)*. FAO. 1998.

14. FAO-UNESCO. *Soil Map of the World*. FAO. 1981.

15. H. Jenny. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill. 1941.

explica por un gradiente de cualquiera de estas variables o de todas ellas, por lo que el número de estados diferentes del *sistema-suelo* es prácticamente infinito. De esta forma se conseguía expresar matemáticamente la extraordinaria *variabilidad espacial* de los suelos, que ya había sido puesta de manifiesto por los estudios descriptivos o reconocimientos cartográficos. Hoy se considera que se pueden identificar 100.000 tipos de suelos diferentes.

En España, durante el primer tercio del siglo XX, se publican los estudios edafológicos de Emilio Huguet del Villar (1871-1951), destacando su obra "*Los suelos de la Península Luso-Ibérica*"¹⁶ que incluye el primer mapa de suelos de la península a escala 1/1.000.000. A su vez, y desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), José María Albareda (1902-1966) fue el propulsor de los estudios científicos de suelos, y de los estudios biológicos en general, mediante la creación de los diferentes institutos y centros de edafología distribuidos por la geografía española¹⁷. De estos primeros tiempos de la Edafología en el Consejo, y más concretamente en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto (CEBAC), son los "Estudios Agrobiológicos de las Provincias de Sevilla, Cádiz y Córdoba" a escala 1/250.000¹⁸, en los que participaban todos los integrantes de este Centro, con diversas colaboraciones externas, dirigidos por los Profesores González García, Paneque Guerrero y Chaves Sánchez^{19,20}. Con anterioridad a estas fechas el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas (INIA) llevó a cabo diferentes estudios edafológicos, centrados preferentemente sobre zonas de interés agrícola como por ejemplo las tabaquerías²¹. Después de estos inicios, a principio de los años 1970s, se trató de lanzar sin conseguirlo un programa nacional de reconocimiento semidetallado de suelos, a escala 1/50.000, como si tuvo lugar en otros muchos países europeos, Canadá y Australia, o como se llevaba a cabo en nuestro propio país con los estudios geológicos. A mediados de los años 1980s, la configuración de las administraciones autonómicas pudo propiciar la realización de programas de reconocimientos detallados de suelos, incluso se intentó en Andalucía y Cataluña, pero ya fue tarde dada la euforia tecnológica que provocaba en aquel entonces las imágenes teledetectadas y su tratamiento informático. Como ocurrió también en otros países se paralizaron los trabajos de cartografía de suelos e iniciaron los de recopilación e informatización de datos ya elaborados. En nuestro caso, las publicaciones "*Catálogo de Suelos de Andalucía*"²² y "*Evaluación Ecológica de Recursos Naturales de Andalucía*"²³ son buen ejemplo de ello.

16. E. Huguet. *Los Suelos de la Península Luso-Ibérica*. 1938.

17. J.M. Albareda. *El Suelo*. CSIC. 1940.

18. CEBAC. *Estudio Agrobiológico de las Provincias de Sevilla, Cádiz y Córdoba*. CSIC. 1962, 1963, 1972.

19. F. González. *Desarrollo de la Ciencia del Suelo en España*. I CNCS, Madrid. 1984.

20. G. Paneque. *La Investigación en Edafología y Química Agrícola del Prof. Dr. D. Francisco González*. Discurso de Apertura del Curso 2005-2006, RASC. 2005.

21. INIA. *Estudios Agroedafológicos de las Zonas Tabacaleras Españolas*. SNCET-INIA. 1946-1966.

22. D. de la Rosa et al. *Catálogo de Suelos de Andalucía*. Junta de Andalucía. 1984.

23. D. de la Rosa y J. M. Moreira. *Evaluación Ecológica de Recursos Naturales*. Junta de Andalucía, 1987.

Sobre la generación de conocimiento en la más reciente Ciencia del Suelo, nos parece interesante resaltar la visión de Bouma y Hartemink⁷ que diferencia tres períodos históricos. A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrolló un primer *período productivista* (1945-1970) donde la mayoría de la investigación se orientó al aumento de la producción agrícola, siendo también el tiempo de la especialización de la Edafología en sus tradicionales ramas o sub-disciplinas. Los estudios de campo, a través de los reconocimientos y mapas de suelos, se imponen sobre los de laboratorio. El período ambientalista (1970-finales 1980s) se caracterizó por la preocupación medioambiental alentada fundamentalmente por la Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, celebrada en Estocolmo (1972). Los temas de investigación agraria se fueron sustituyendo paulatinamente por los medioambientales, ante el convencimiento de que un productivismo agrario a ultranza tenía negativas repercusiones ambientales. Los estudios de laboratorio alcanzan el mayor protagonismo. Desde principio de los años 1990s, un nuevo *período integrador* se va abriendo camino, imponiéndose la multifuncionalidad del suelo. La Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente de Río de Janeiro (1992) popularizó el concepto de sostenibilidad, que en los estudios de suelos pretende integrar, combinando simultáneamente, las aplicaciones ambientales y productivistas. Destacan los estudios de gabinete gracias al avance arrollador de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs): teledetección espacial (RS), sistemas de información geográfica (GIS), modelos digitales del terreno (DEM), ingeniería de datos y conocimiento (D&K), etc.

Memorias personales

En el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto (CEBAC), creado en 1953 con sede en el Cortijo de Cuarto, y desde 1985 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), me inicié en 1971 como investigador en la Ciencia del Suelo de la mano de los Profesores D. Francisco González García y D. Guillermo Paneque Guerrero, disfrutando una beca de la Fundación March. También el Profesor D. José Luís Mudarra Gómez tuvo mucho que ver con mi formación inicial en el CEBAC; habiendo sido él mi primer referente por su amistad con mi tío José Márquez González, ambos compañeros de la Facultad de Química. Ellos fueron mis más influyentes profesores en aquellos inicios. Gracias a estos extraordinarios maestros y a otros muchos compañeros del CEBAC que me precedieron, los estudios edafológicos, llevados a cabo directamente en campo y en laboratorio y representados por los mapas de suelos, empezaron a ser elementos clave en mi quehacer investigador. Los mapas, que junto con los modelos y las publicaciones son los resultados más tangibles de mi investigación, siempre me parecieron el mejor esquema intelectual para interpretar la compleja realidad de los suelos.

24. J. Bouma & A. Hartemink. *Soil Science and Society in the Dutch Context*. NJAS 50: 133-140. 2002.

Al principio de los años 1970s tuve la primera noción de la existencia del CSIC, del que formaba parte el CEBAC, y donde habría de transcurrir la mayor parte de los más de cuarenta años de mi vida profesional. Entonces, las conversaciones sobre el Consejo se centraban en la extraordinaria labor realizada por D. José María Albareda quien había fallecido recientemente, y sobre las pugnas entre el CSIC y el INIA (licenciados vs. ingenieros) a la hora de liderar los estudios de suelos. A pesar de jugar en campo extraño (un ingeniero entre licenciados), logré acomodarme y sacar el máximo provecho a lo mucho que el Consejo, con sus laboratorios, instalaciones de campo y bibliotecas, me ofrecía.

Mi primera estancia en el extranjero fue en Portugal, año 1973, con el Profesor José C. Cardoso de la Estación Agronómica Nacional de Oeiras, integrándome en los equipos del “Servico de Reconhecimento e de Ordenamento Agrario” que llevaba a cabo el levantamiento detallado de suelos de aquel país. Más adelante, mi estancia en EEUU en el Departamento de Suelos de la Universidad de Florida, disfrutando de una beca Fulbright, en los años 1976 y 1977, tuvo un impacto decisivo en mi formación profesional. De los Profesores Vic Carlisle y Charles Eno, así como de los demás miembros del staff de dicho departamento, guardo los mejores recuerdos y reconocimiento. El haber sido ya doctor en aquel entonces, me permitió disfrutar del status de “Visiting Assistant Professor” que me daba la mayor consideración y facilidad para acceder a los muchos recursos y servicios de aquella universidad americana. Ello me dio también la oportunidad de participar en las actividades del mítico “US Soil Conservation Service”, y de conocer a los responsables del “US Soil Survey” y a los impulsores del sistema de clasificación de suelos “Soil Taxonomy” liderados por el prestigioso Professor Guy D. Smith. Sin lugar a dudas, mi estancia en EEUU supuso un antes y un después en mi carrera científica.

4. EXPERIENCIA PRÁCTICA

Para mejor comprender el elemento central de este discurso que desarrollaremos más adelante, considero oportuno enumerar al menos los aspectos más relevantes de la problemática agrícola al margen del conocimiento edafológico. Con la *experiencia práctica* o *conocimiento ordinario* nos referimos al comportamiento del sistema-suelo cuando se utiliza y gestiona haciendo agricultura. Partimos de la base que para conseguir una buena y realmente sostenible agricultura resulta imprescindible contar con el conocimiento científico y a la vez con la experiencia práctica o tecnológica.

Las prácticas agrícolas han experimentado cambios muy significativos con el paso del tiempo, desde la agricultura más tradicional hasta la conocida actualmente como de precisión.

En general, los grandes logros del mundo de la técnica como pueden ser el reloj (siglo XIII), la imprenta (siglo XV), la máquina de vapor (siglo XVIII) y el ordenador (siglo XX) han jugado un papel significativo en la historia de la civilización, incluyendo la manera de hacer agricultura. Los dos últimos de estos logros tuvieron mucho que ver,

respectivamente, con la *Revolución Industrial*, centrada primero en Inglaterra y después en Alemania, y con la *Revolución Digital* alrededor del ordenador e iniciada en EEUU. Particularizando, entre los descubrimientos o hallazgos tecnológicos más influyentes en la historia reciente de la agricultura, destacan los siguientes acontecimientos.

A finales del siglo XIX, surgió el *uso del tractor* para la mecanización de las principales tareas agrícolas, disminuyendo sustancialmente la mano de obra empleada y la tracción animal. Desde los primeros tractores de vapor hasta los actuales con motores de combustión interna y sofisticados dispositivos de manejo y control: servos, GPS, LASER, etc., así como los aperos más diversos: arados, cultivadores, abonadoras, fumigadoras, picadoras, segadoras-trilladoras combinadas o cosechadoras, etc., continúan su avance innovador.

En la década de los años 1920s, destaca la *síntesis catalítica del amoníaco* por el proceso Haber-Bosch, mediante la combinación directa del nitrógeno y el hidrógeno. Esta captura industrial del nitrógeno atmosférico que se materializa en los fertilizantes químicos ha sido, sin lugar a dudas, uno de los descubrimientos más trascendentes para el desarrollo de la agricultura moderna. La fabricación industrial de otros fertilizantes, sobre todo fosfatados y potásicos, ha sido igualmente trascendente para la agricultura.

Desde los años 1950s, la aplicación masiva de plaguicidas o agroquímicos fue considerada, como una revolución de la agricultura. Estas sustancias se utilizan para el *control químico de plagas*, especialmente malas hierbas, insectos, hongos y otros organismos vivos. Algunos estiman que sin el empleo de productos agroquímicos, las pérdidas de ciertas cosechas podrían alcanzar hasta el 40 %. Al margen de sus claros beneficios, la experiencia ha demostrado que estos métodos suelen perjudicar la salud humana y el medio ambiente, y a la larga resultar también ineficaces; como ha sido el caso del DDT, un compuesto actualmente prohibido.

En la década de los años 1960s, técnicas relativamente nuevas tales como el riego localizado, por goteo y microaspersión, supusieron una mejora muy importante en la *eficiencia en el uso del agua* para la agricultura. Israel logró la expansión de estas técnicas, muy particularmente en zonas áridas y semidesérticas donde el agua es escasa, con un cambio profundo en los sistemas de aplicación del agua al suelo y un aumento importante de la productividad.

Fundamentalmente entre los años 1960s y 1970s, tuvo lugar la llamada *Revolución Verde*, cuyo padre fue Norman Borlaug (Premio Nobel 1970), que se caracterizó por la mejora genética de las variedades de cereales de grano, junto con el uso intensivo de ciertas prácticas agrícolas, consiguiendo incrementos espectaculares de cosecha. La producción de grano mundial llegó a aumentar en un 250 %. Actualmente, continua el avance innovador de los *cultivos genéticamente modificados*, en especial soja, maíz, colza, arroz, algodón y otros. Existen ya variedades mejoradas con hasta ocho genes transferidos con resistencia a plagas y tolerancia a herbicidas; y en unos años se podrían conseguir variedades con 20 genes transferidos. Próximamente parece que se comercializará en EEUU la primera variedad de maíz tolerante a la sequía. Estos cultivos genéticamente modificados no solo tienen rasgos agronómicos mejorados, sino también rasgos de calidad nutricional mejorada, tales como el enriquecimiento o bio-fortifica-

ción en aminoácidos esenciales, pro-vitamina A, hierro, zinc, ácidos grasos insaturados, omega3, etc.

En la actualidad, la biotecnología aplicada a la agricultura se extiende también a la eliminación de contaminantes en los suelos. Con especial referencia a la contaminación por pesticidas y metales pesados, estas técnicas de *bio-recuperación* hacen uso de microorganismos genéticamente modificados. Sobre el uso de microorganismos vivos en la agricultura, es también destacable la *explotación biológica de nutrientes*, tanto para capturar el nitrógeno atmosférico y restaurarlo al suelo, como para solubilizar y movilizar el fósforo que es muy abundante en la mayoría de los suelos aunque en forma no disponible.

Además de estos grandes logros tecnológicos, la agricultura se ha beneficiado también de ciertos *artefactos técnicos menores* o herramientas prácticas. Son de destacar el arado, el cultivador, la guadañadora y la segadora; los molinos de agua, de viento y de sangre; la noria y el cigoñal; la bomba helicoidal y la prensa hidráulica; o incluso la azada, la tijera y el alambre de espino.

La intensidad de aplicación y grado de combinación de las tecnologías que se derivan de estos grandes y pequeños hallazgos determinan los diferentes tipos de agricultura que se vienen utilizando: tradicional, productivista, de conservación, integrada, ecológica o de precisión. Sin entrar a detallar las prácticas propias de cada uno de estos sistemas agrícolas, sí interesa resaltar cuan importante resulta para la evaluación de suelos la descripción minuciosa de todas las prácticas que lleva a cabo el agricultor a lo largo de una campaña: *labores del suelo, abonado, siembra, poda, uso de plaguicidas, aplicación del riego, recolección y tratamiento de residuos*.

Las referencias precisas al lugar, es decir a cada tipo de suelo dentro de una finca o parcela, y al tiempo son igualmente imprescindibles. Sobre el comportamiento de cada suelo sometido a las prácticas agrícolas correspondientes conviene registrar no solamente la cosecha obtenida, sino también el impacto ambiental producido y observable: pérdida de biodiversidad, erosión, compactación, contaminación, salinización, etc.

Esta información “blanda” suele ser de tipo observacional, resultado de entrevistas con agricultores y técnicos, o de tipo experimental como consecuencia de experiencias de campo realizadas tras muchos años de investigación. Desgraciadamente, en los reconocimientos de suelos se sigue haciendo especial hincapié en la caracterización, génesis y clasificación natural de los individuos-suelo, pero se recaba muy poca información sobre las problemáticas asociadas con el uso y manejo de cada suelo caracterizado.

En términos generales, y sin entrar en detallar cada tipo de agricultura, se puede afirmar que la agricultura productivista o intensiva (*intensificación*) al igual que el abandono de tierras (*extensificación*) son los principales enemigos de los ecosistemas agrícolas. El escaso número de cultivos, el uso abusivo de fertilizantes y plaguicidas, y la homogenización del paisaje tienen todos ellos efectos muy negativos sobre la biodiversidad y el medio ambiente en general. Como indicador de esas pérdidas de biodiversidad, desde 1980 las aves comunes de los ecosistemas agrícolas europeos han disminuido en un 50 %, aunque esta población parece haberse estabilizado a partir de 1995²⁵.

25. EEA. *Environment in the EU at the turn of the century*. European Environment Agency. 1999.

Memorias personales

Sobre mi adquisición personal de experiencia práctica, tengo que resaltar el haber disfrutado de una atalaya privilegiada, al margen de mi formación como ingeniero agrónomo. De abuelos y padres agricultores y poseedor de una intensa infancia rural en el pueblo de Pilas, como hemos comentado anteriormente, el ejemplo continuado de mi padre y tíos como excelentes empresarios agrícolas y el trato con jornaleros, guardas y manigeros fueron fuentes inagotables de enseñanzas sobre las cosas del campo. También, al haber seguido gestionando nuestra finca familiar, no he dejado de ilustrarme sobre la problemática agraria actual y de mantener el apego por el medio rural.

Entre los años 1950s y 1960s, conocí cómo en los caseríos de campo la “sala de máquinas”, donde la reina de ellas era la trilladora, comenzaba a ser más importante que las cuadras de los animales. No obstante, en esas fechas todavía eran frecuentes las hileras de yuntas arando besanas y olivares, las cuadrillas de sembradores y segadores a mano y hoz, la trilla de habas y garbanzos con trillos tirados por mulos, las cuadrillas de “macheadores” labrando las viñas con azadón, etc. Todas estas faenas de la agricultura tradicional, de las que actualmente solo perdura la cogida a mano de la aceituna de verdeo, se continuaban en la casa de labranza, con molino, lagar, bodega, granero, pajar, cuadra, etc., hasta obtener los productos elaborados: aceite, vino, granos, paja, carne, miel, conservas, etc. Todo ello lo recuerdo acompañado de los olores propios de las diferentes elaboraciones, tales como la vendimia, la almazara, la matanza o la trilla. Como tengo ocasión de comprobar hoy en mi finca de Vizco, ese tipo de campo tradicional ya no existe aunque el territorio siga ahí y los suelos igualmente perduren.

Esta adquisición personal de experiencia práctica sobre el uso y manejo de los suelos a nivel de usuario directo del territorio, por las circunstancias ya mencionadas, se vio incrementada a nivel de administración durante mi estancia de 6 años (1982-1988) en la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Durante este tiempo, la situación de comisión de servicio desde el CSIC a la Junta que daba sus primeros pasos fue muy ilusionante para mí. Se trataba en aquel entonces de crear una nueva administración moderna y más eficaz. Desde el principio, cuando toda la administración central de la Junta se acomodaba en el edificio del Pabellón Real, me encargué del Servicio de Conservación de Suelos. Para ello y siguiendo los principios agro-ecológicos, tratamos de introducir y desarrollar una norma que era “Planificar la mejor manera de conservar”. Las vicisitudes personales de aquella fructífera e intensa etapa de mi vida en la Administración Pública, que sería largo de contar, generaron experiencias muy valiosas para mí quehacer investigador a la vuelta al Consejo.

5. CONOCIMIENTO VS. EXPERIENCIA

Llegado a este punto, el elemento central del discurso no es otro que la forma de combinar el conocimiento científico de los suelos (datos) con la experiencia práctica (*observaciones*) sobre su comportamiento agrícola. Con el fin de predecir el futuro

posible, se trata de recorrer los dos caminos al mismo tiempo, con un pie en cada uno de ellos: el camino de la investigación básica o descripción teórica y el camino de la realidad experimental o comportamiento práctico.

En la *Metodología de la Ciencia*, que se ocupa de cómo son los procesos científicos, destaca una doble vertiente: por un lado, la faceta analítica que aborda el conocimiento presente y pasado (*explicación científica*); y por otro, la tarea de previsión del futuro posible mediante métodos óptimos (*predicción científica*; Figura 3). Para las Ciencias Aplicadas, y muy particularmente para las Ciencias de la Naturaleza, la predicción científica resulta ser un factor clave, a pesar de la mayor dificultad en relación con la explicación de los hechos conocidos y de la falta de fiabilidad absoluta de los pronósticos. Incluso, algunos filósofos de la *Ciencia* (ej.: K. Popper²⁶) piensan que el auténtico objetivo de la Ciencia, no uno más, debe ser la previsión del futuro. Sin embargo, la superioridad metodológica de la *predicción* sobre la explicación es un tema controvertido que se sigue actualmente debatiendo, tanto sobre bases conceptuales como desde el estudio de casos históricos²⁷. Con relación a la *Ciencia del Suelo*, toma cuerpo una nueva tendencia que llega a condicionar la validez de los estudios científicos sobre los suelos a estar encaminados a la verdadera resolución de los problemas reales. Para ello, los enunciados científicos deben plantearse como claro indicador de la orientación hacia el futuro y no quedarse en el conocimiento presente o pasado²⁸.

Aunque el problema de la predicción científica tiene múltiples variantes, destaca el nexo de unión con las matemáticas que facilita los desarrollos metodológicos a través de los *modelos numéricos* con un cierto margen para los componentes teóricos. Las predicciones más sofisticadas o plenamente científicas se llevan a cabo mediante el uso de modelos matemáticos. Los modelos utilizan un algoritmo o formulismo matemático que es una lista bien definida, ordenada y finita de operaciones que permite hallar la solución a un problema. Dado un estado inicial y una entrada, a través de pasos sucesivos y bien definidos se llega a un estado final, obteniéndose como resultado una solución.

Los *modelos* como los mapas no son más que esquemas intelectuales que interpretan la realidad (su “verdad”). Siguiendo este símil, no hay que confundir el modelo con la realidad como tampoco el mapa con el territorio. Un modelo es una representación simplificada, generalmente matemática o computacional, de un sistema, mediante la cual se obtienen resultados de su funcionamiento sin necesidad de realizar experimentos reales. Los modelos aunque sean del tipo empírico o fenomenológico (“caja negra”), que solo pretende servir de instrumento para sintetizar y predecir observaciones, suelen resultar de la mayor utilidad. En estos casos, para desarrollar un modelo basado en la observación se precisa de una infraestructura de información comprehensiva que cubra el conocimiento del sistema como un todo. Estos modelos son típicos artefactos ingenieriles, algo real y tangible, cuya eficiencia y efectividad permiten una experimentación múlti-

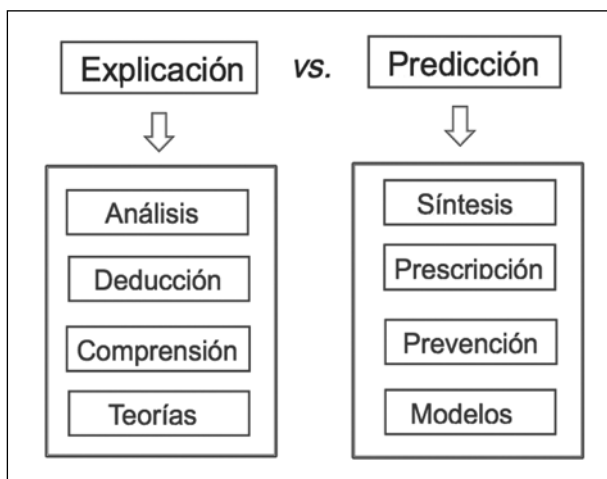
26. K. Popper. *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson. 1959.

27. W.J. González. *La Predicción Científica*. Montesinos. 2010.

28. D. de la Rosa. *Superioridad Metodológica de la Predicción Científica*. V SNCDUS. 2011.

ple que es la mejor medida de calidad y excelencia. De esta forma, la aplicación de los modelos permite no solo calcular resultados pronosticados en condiciones reales, sino también generar nuevas hipótesis o resultados hipotéticos en escenarios de cambio. Este abanico de resultados facilita la optimización del sistema modelado y la formulación de medidas de gestión y adaptación a los cambios futuros²⁹.

FIGURA 3
VERTIENTES DEL MÉTODO CIENTÍFICO



La mejor manera de analizar y, sobre todo, sintetizar el conocimiento y la experiencia sobre un sistema complejo, como trata de hacer la evaluación de suelos para el sistema suelo-uso, es la *modelización* de dicho sistema. Este extraordinario desarrollo de la modelización ha sido posible gracias a la revolución científico-técnica de la última parte del siglo pasado, siendo liderada por las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs), y muy particularmente por la teledetección espacial y la ingeniería de datos y conocimientos.

Memorias personales

Los primeros trabajos de armonización e informatización de datos y modelización matemática del sistema suelo-uso los llevé a cabo durante mi estancia en la Universidad de Florida de EEUU en los años 1976 y 1977, haciendo uso de los enormes macro-ordenadores (“mainframes” del tipo IBM OS/370) instalados en su “Computer Center”. Además de tratarse del edificio más novedoso y llamativo del campus universitario, llamaban la atención las aulas anexas con las ruidosas máquinas perforadoras

29. A. Ball & D. de la Rosa. *Modeling Possibilities for Assessment of Soil Systems*. CRC Press. 2006.

de tarjetas IBM. Estas aulas (“key-punch room”) albergaban unas 50 máquinas perforadoras manuales, como artefactos que vibraban con mecánica perfecta y que emitían un timbrazo característico al acabar las 80 columnas de cada tarjeta. Para orientarnos, en esos mismos años ocurrieron en EEUU, concretamente en “Silicon Valley”, dos hechos trascendentes en la historia de la “Era de la Información”: en 1976, Bill Gates fundó su propia empresa, Microsoft Corporation, de producción de software para los nuevos micro-ordenadores (los PCs); y en 1977, Steve Jobs y Steve Wozniak lanzaron el primer ordenador personal de Apple.

Más tarde en Sevilla, a finales de los años 1970s y aún lejos de que llegaran los PCs, frecuenté la Facultad de Matemáticas de Reina Mercedes que disponía de conexión telefónica con un gran ordenador Univac 1108 del Centro de Cálculo del CSIC en Madrid. A principio de los 1980s, el Centro de Cálculo de dicha Facultad se dotó de un ordenador central Univac 90/30 y la ETS de Ingenieros también instaló un equipo Hewlett Packard, que utilicé con frecuencia. A mediado de los 1980s, en la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, instalamos un novedoso mini-ordenador Digital VAX 78032, después de intentos previos con otros ordenadores IBM y SECOINSA, como núcleo central de la arquitectura informática que inicialmente soportó al SinamBA: Sistema de Información Ambiental de Andalucía.

En esos años de mediado de los 1980s, la teledetección espacial, principalmente a través de los satélites Landsat y Spot, nos sorprendió y provocó una verdadera euforia tecnológica a todos los que nos dedicábamos al estudio del territorio, tratando de aprovechar las enormes posibilidades de esta nueva técnica en la aportación de datos cartográficos y elaboración de mapas. Con la inestimable ayuda de Loic Menanteau, logramos los primeros resultados de aplicación de esta técnica en el marco del SinamBA. La serie de mapas provinciales, a escala 1/200.000, de Andalucía, así como los de toda la región, a escala 1/400.000, creo que fueron estudios pioneros y hasta cierto punto precursores de lo que hoy, 25 años más tarde, ofrece a nivel mundial el coloso Google.

En mi etapa de director del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla del CSIC (1994-1998), también llevamos a cabo la recopilación, armonización e informatización del extraordinario volumen de datos históricos de suelos generados en el Instituto, concretamente en los antiguos laboratorios de cartografía, física y fertilidad, a lo largo de más de 40 años. Esta ingente labor de numerosos colaboradores permitió la elaboración de diversas bases de datos que almacenan cientos de miles de datos geo-referenciados, sobre más de 1.000 perfiles de suelos y 15.000 sondeos, localizados preferentemente en Andalucía Occidental. Creo que no hace falta resaltar la importancia de esta infraestructura digital de acceso abierto, como el mayor capital científico del IRNAS a la hora de facilitar la transferencia de resultados de la I + D y conseguir la deseada innovación.

Sobre la importancia de simultanear la generación de conocimiento científico y ordinario, siempre recuerdo el lema del Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS) de la Universidad de Florida “Research, Teaching and Extension” motivando, e incluso obligando, a todos sus componentes a desarrollar al mismo tiempo tales tareas. No era

posible que algún investigador estuviese dedicado “full time” a tareas científicas, sin dedicar parte de su tiempo a la enseñanza y a la divulgación.

6. EVALUACIÓN DE SUELOS

Vayamos ya a destacar los aspectos metodológicos más relevantes de la investigación interpretativa sobre uso y protección de los suelos. La *evaluación de suelos*³⁰, la rama de la Ciencia del Suelo con una mayor aplicabilidad práctica, trata de predecir las consecuencias del cambio de uso y manejo de los suelos, mediante la combinación del conocimiento y la experiencia sobre el *sistema suelo-uso*. Este sistema suelo-uso es un conjunto sumamente complejo y dinámico de múltiples componentes y procesos, donde es obligado interpretar su comportamiento práctico siguiendo un procedimiento global e integrado. Por ello, la influencia de las interacciones entre variables, físicas, químicas y biológicas, suele ser tan importante como el efecto directo de cada una de ellas sobre el comportamiento del suelo.

La mejor manera de analizar y sintetizar el conocimiento de un sistema natural tan complejo, como trata de hacer la evaluación de suelos, es la *modelización* de dicho sistema. De acuerdo con su complejidad descriptiva, los modelos que se utilizan se pueden clasificar en empíricos y mecanicistas. En los *modelos empíricos* se desconocen los procesos endógenos, estableciéndose las relaciones basadas exclusivamente en la experiencia o el conocimiento del sistema. Entre los empíricos o basados en el conocimiento se incluyen desde los más simples o cualitativos a los paramétricos, estadísticos, sistemas expertos, de lógica difusa, en red neuronal y otros. A su vez, los *modelos mecanicistas* o de simulación dinámica tratan de modelizar los mecanismos biofísicos, según las leyes de la naturaleza, para describir los cambios del sistema a lo largo del tiempo. En cualquier caso, y como suele ocurrir en las Ciencias Aplicadas se trata de establecer el futuro posible (*Predicción*) y, al mismo tiempo, el modo de actuación para abordarlo (*Prescripción*).

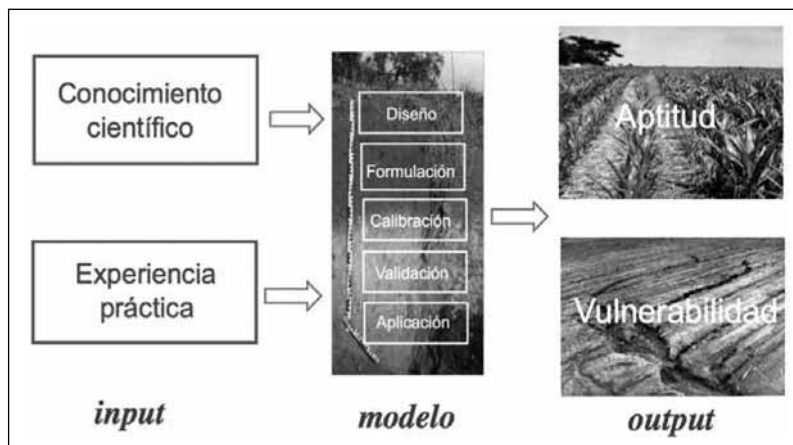
En nuestro libro “*Evaluación Agro-ecológica de Suelos para un Desarrollo Rural Sostenible*”³¹, mucho más accesible que los artículos especializados y con una extensa bibliografía que facilita indagaciones más profundas, se lleva a cabo una descripción detallada de las diferentes fases de la modelización biofísica: diseño, formulación, calibración y validación, que hay que cubrir para desarrollar un modelo de evaluación de suelos (Figura 4), así como de su diversa tipología. A continuación hacemos un apretado resumen de los diferentes procedimientos interpretativos, fundamentalmente modelos de menos a más complejidad, utilizados para la evaluación de los suelos.

Las *evaluaciones cualitativas* pueden tomar la forma de simples descripciones subjetivas sobre la aptitud de los suelos para determinados usos, agrupando los diferentes tipos de suelos en ciertas clases o categorías de aptitud. Estos sistemas de evaluación de

30. FAO. *A Framework for Land Evaluation*. FAO. 1976.

31. D. de la Rosa. *Evaluación Agro-ecológica de Suelos*. CSIC/Mundi-Prensa. 2008.

FIGURA 4
MODELIZACIÓN BIOFÍSICA DEL SISTEMA SUELO-USO-DEGRADACIÓN



suelos dependen en gran medida de la experiencia y del conocimiento intuitivo, constituyendo verdaderos sistemas empíricos que no ofrecen la menor expresión cuantitativa. Desde el inicio de la Ciencia del Suelo, probablemente el primer sistema de evaluación cualitativa de la productividad del suelo fue el desarrollado por Whitney a principios del siglo XX agrupando los suelos de EEUU en tres categorías agrícolas y en una no-agrícola. Whitney dedujo que la productividad real dependía de los factores técnicos y económicos, pero también de los tipos de suelos, y trató de clasificar los suelos según su potencial de uso, independientemente del uso actual.

En otros estudios cualitativos se logra una cierta cuantificación mediante la aplicación de la *norma de máxima limitación*, según la cual la característica más restrictiva determina el grado de aptitud de los suelos. Para ello se asume el conocimiento sobre los requerimientos óptimos de los usos y sobre las consecuencias de las desviaciones de esos óptimos. En estos casos, se utilizan *tablas de correspondencia* como la que se muestra en la Tabla 1. A veces se introducen cambios importantes a partir de este esquema, haciendo que las clases de aptitud dependan de más de un conjunto de características o cualidades de tierras, lo que conduce a tablas o diagramas más complejos³².

Como un primer paso real dentro del proceso de cuantificación en la evaluación de suelos, los *métodos de factor único* (“OF: One Factor”) expresan numéricamente la influencia de una sola característica sobre el funcionamiento del sistema suelo-uso. Este análisis aislado de interpretación sigue el principio de Liebig, en su “ley del mínimo”, posteriormente transformado en la conocida y ya citada ecuación [1] de Mitscherlich³³. Estos esquemas OF (Figura 5) se suelen utilizar en aquellos casos en los que una cierta característica del suelo tiene un efecto extremo, positivo o negativo, sobre un uso determinado, como por ejemplo el de la *profundidad* útil sobre la productividad de un

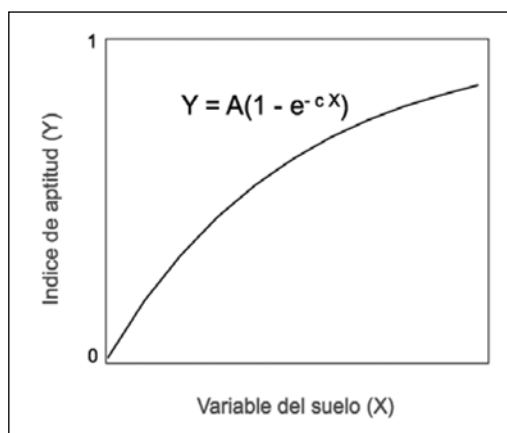
32. USDA. *Land Capability Classification*. Agricultural Handbook. 1961.

33. E.A. Mitscherlich. *Landwirtsch. Jahrb* 38: 537-552, 1909.

TABLA 1
EJEMPLO DE TABLA DE CORRESPONDENCIA PARA EVALUACIÓN DE SUELOS

Clase de aptitud	Característica del suelo			
	Profundidad útil (cm)	Textura	Salinidad (mS/cm)	Pendiente (%)
S1 - Muy elevada	> 120	Media	< 2	< 3
S2 - Elevada	60 - 120	Media a Fina	2 - 4	3 - 8
S3 - Moderada	30 - 60	Media a Gruesa	4 - 8	8 - 15
S4 - Baja	15 - 30	Gruesa	8 - 10	15 - 30
N - Nula	< 15	Muy fina	> 10	> 30

FIGURA 5
MÉTODO DE FACTOR ÚNICO EN EVALUACIÓN DE SUELOS



cultivo. A través de una *curva de respuesta*, se considera que la profundidad del suelo guarda una correlación positiva con la productividad, sobre todo cuando el suelo es poco profundo, y tiende a la asíntota cuando la profundidad se aproxima a la de enraizamiento del cultivo. Aunque estos sistemas de factor único no tienen en cuenta el efecto de dos o más características, se pueden combinar los valores calculados individualmente para varias de ellas con objeto de generar un índice de aptitud más próximo a la realidad del sistema suelo-uso.

A medio camino entre los sistemas típicamente cualitativos y los cuantitativos, se encuentran los *métodos semi-cuantitativos o aritméticos* de evaluación de suelos que consideran los efectos numéricos inferidos de varias características sobre el comporta-

miento potencial de un tipo de uso del suelo. Se suelen utilizar estos métodos paramétricos (“PS: *Parametric System*”) o aritméticos como una fase de transición entre los métodos cualitativos basados íntegramente en criterios subjetivos y los modelos matemáticos más avanzados. Los *sistemas aritméticos* tienen en cuenta la acción directa de las características o factores más significativos y contabilizan, a su vez, la interacción entre dichos factores mediante una simple multiplicación o suma de los índices correspondientes a cada factor.

Storie³⁴ intentó por primera vez desarrollar criterios multiplicativos específicos para evaluar de manera inductiva la productividad del suelo. El índice original de Storie (SIR) se calcula multiplicando las valoraciones parciales correspondientes a la morfología del perfil del suelo (*A*), la textura superficial (*B*), el ángulo de pendiente (*C*) y las condiciones modificadoras, tales como profundidad útil, drenaje o alcalinidad (*X*), de la siguiente forma:

$$SIR = A \cdot B \cdot C \cdot X \quad [3]$$

Storie puso de manifiesto que los resultados de la aplicación de su sistema de evaluación de suelos se debían tomar como *criterio discriminante* entre suelos y no como valores absolutos de productividad. Además, las tablas de evaluación de los diversos factores se debían ir cambiando conforme los evaluadores van ganando experiencia utilizando dicho índice.

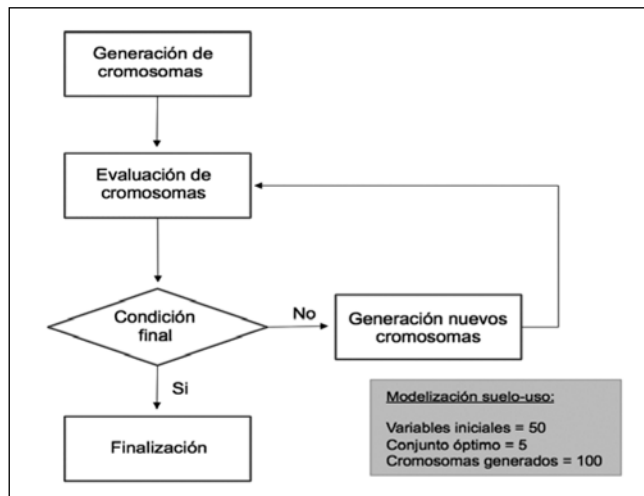
Entre las técnicas basadas en la inteligencia artificial, los *algoritmos genéticos* (“GA: *Genetic Algorithm*”) pertenecen a la familia de los poderosos algoritmos de evolución que se utilizan para encontrar las mejores soluciones en la investigación y optimización de problemas. La metáfora que subyace en los GAs se corresponde con la selección biológica natural y la evolución genética de los seres vivos, por la que solo los individuos más fuertes son los que sobreviven y tienen mayor posibilidad de reproducirse. Cada algoritmo puede ser considerado como un simple sistema biológico natural, en el que las mejores soluciones son seleccionadas, continuando en la competición, mientras que las peores soluciones son eliminadas.

Las posibles soluciones GA a un problema determinado se conocen como *cromosomas*, también llamados genomas. Tal y como se esquematiza en la Figura 6, las principales operaciones que ejecuta un algoritmo de manera interactiva son: inicialización, evaluación, selección, cruce y mutación. La evaluación de los cromosomas se lleva a cabo mediante una función de evaluación específicamente diseñada en cada caso. Con los mejores resultados de la evaluación y tras sucesivas mutaciones se generan o reproducen nuevos cromosomas que sufren el mismo proceso. Por último, el proceso interactivo termina cuando se cumple la condición de finalización, que suele ser la consecución de una solución o cromosoma aceptable o la realización de un número prefijado de generaciones.

En la modelización del sistema suelo-uso, las técnicas GA se suelen utilizar para seleccionar el conjunto óptimo de variables input, entre los numerosos atributos edafi-

34. R.E. Storie. *An Index for Rating the Agricultural Value of Soils*. 1933.

FIGURA 6
ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA SELECCIÓN DE VARIABLES INPUT



cos, climáticos y agronómicos que se contemplan inicialmente en el diseño del modelo. Así, se puede partir de unas 50 variables potenciales para desarrollar el análisis de predicción, que codificadas en el sistema binario se corresponde con un número extremadamente elevado de soluciones potenciales o cromosomas (250). A partir de ahí, el algoritmo seleccionará el mejor cromosoma que incluirá el conjunto óptimo de 5 ó 10 variables input, tal vez, tras la ejecución de unas 100 generaciones³⁵.

En la evaluación de suelos los sistemas estadísticos, fundamentalmente los modelos de regresión múltiple (“*MR: Multiple Regression*”) son métodos muy utilizados para predecir la aptitud relativa basándose en seleccionadas características edáficas. Cuando se dispone de suficientes datos básicos de una zona representativa de referencia, tanto sobre características del suelo como sobre el comportamiento del mismo, los modelos estadísticos proporcionan muy buenos resultados. Los análisis estadísticos de correlación y regresión múltiple se emplean para investigar las contribuciones relativas de las características seleccionadas. La variable respuesta o comportamiento del sistema de uso considerado Y se analiza como una función del tipo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + e \quad [4]$$

donde las variables independientes X_n corresponden a las características del suelo seleccionadas, por ejemplo, profundidad útil, contenido de arcilla, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, saturación de sodio, etc.; y e recoge los valores residuales. Como la expresión matemática de f es desconocida, esta función puede estimarse satisfactoriamente dentro del campo experimental, asimilándola a un polinomio.

35. F. Zhang. *Decision Support System for Tomato Yield Prediction*. IGI Global. 2010.

La calibración de este modelo polinomial se calcula estadísticamente como un caso particular de regresión múltiple. El coeficiente de determinación múltiple (R^2) proporcionado por este análisis representa un índice inductivo de validación del modelo calibrado al expresar el porcentaje de variación observada que explica dicho modelo.

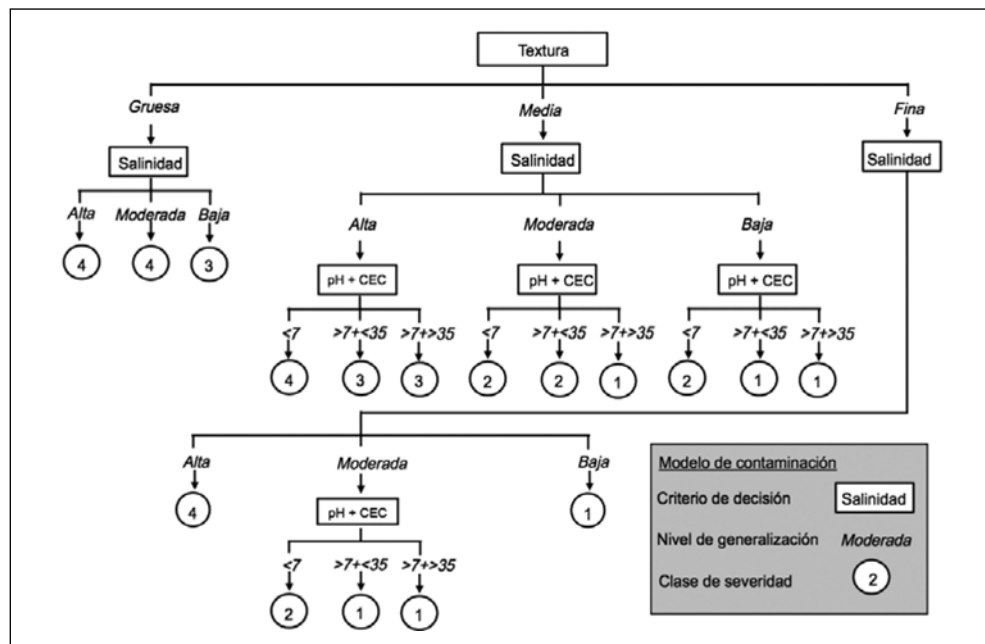
Esta metodología se ha empleado sobre todo en la predicción de la productividad del suelo para distintos cultivos. En estos casos, edafólogos y agrónomos han de trabajar conjuntamente con los estadísticos e informáticos en el desarrollo de los modelos de regresión para conseguir buenos resultados.

En la evaluación de suelos, la modelización empírica ha progresado desde los más simples modelos estadísticos hacia otros más complejos basados en técnicas de inteligencia artificial. *Los sistemas expertos* (“ES: Expert System”), como una de las técnicas de inteligencia artificial, son programas informáticos que simulan la capacidad resolutoria de los expertos humanos en un campo determinado, proporcionando soluciones a un problema. Estos sistemas expresan el conocimiento inferido utilizando árboles de decisión. En la evaluación de suelos, los árboles de decisión proporcionan una expresión muy clara del proceso de comparación entre los requerimientos de usos del territorio y las características o cualidades del suelo. Como en cualquier otro sistema de evaluación, cuanto más profundo y detallado sea el conocimiento básico de partida, mejor será el resultado de la aplicación de los sistemas expertos. Al igual que en otros casos de modelización del sistema suelo-uso, este conocimiento de partida procede tanto de la investigación científica previa (*descripción teórica*), como de los resultados de experiencias y discusiones con expertos locales (*experiencia práctica*).

Los árboles de decisión son ESs jerárquicos de múltiples caminos en los que las derivaciones se corresponden con los criterios de decisión y sus posibles opciones, como por ejemplo los niveles de generalización de las características; y las salidas con las decisiones, como por ejemplo las clases de aptitud del suelo. Tal y como se muestra en la Figura 7, los árboles de decisión en la evaluación de suelos visualizan la secuencia de las decisiones tomadas de una forma mucho más clara que las tradicionales tablas de correspondencia o evaluación.

En términos generales, los sistemas cualitativos de evaluación de suelos siguen un enfoque “booleano” o basado en reglas adaptadas al principio de máxima limitación. Sin embargo, existe un convencimiento creciente de la incapacidad de este enfoque para analizar la naturaleza inexacta o difusa de muchos de los aspectos de los recursos naturales. El uso de la *lógica difusa* (“FL: Fuzzy Logic”) en la evaluación de suelos es de particular importancia ya que es posible minimizar el efecto de cualquier característica cuando alcance un valor inmediatamente exterior a su rango establecido. De esta forma, la rígida lógica booleana en la aptitud de suelos, tal y como se determina por las características seleccionadas, es remplazada por *funciones difusas de pertenencia*. En los casos a evaluar que corresponden claramente a las clases definidas se les asigna un valor de pertenencia (MF) igual a 1, mientras que en aquellos que no entran en dichas clases se les asigna un valor de pertenencia entre 0,0 y 1,0, dependiendo del grado de cercanía a la clase definida. De acuerdo con ello, la lógica booleana admite sólo dos posibilidades de pertenencia: completa (MF = 1) o nula (MF=0).

FIGURA 7
EJEMPLO DE ÁRBOL DE DECISIÓN PARA EVALUACIÓN DE SUELOS



Las características transformadas en clases se convierten así en grados de pertenencia dependiendo de los valores de las características. La valoración global de la aptitud de las unidades-suelo se basan entonces en un factor de ponderación de las características relevantes. La función conjunta de pertenencia (*JMF*) se obtiene mediante una suma ponderada de las diferentes características (*A*, *B*, ...*Z*) de la siguiente forma:

$$JMF_x = a_A MF_A + a_B MF_B + \dots + a_Z MF_Z \quad [5]$$

donde:

$$a_A + a_B + \dots + a_Z = 1$$

La calibración de estas ponderaciones (a_A , a_B ... a_Z) resulta de gran importancia y se suele obtener a partir del conocimiento experto local, de datos experimentales o calculados mediante anteriores métodos de evaluación, etc.

La utilización de la estricta álgebra booleana: verdadero o falso, al igual que un modelo rígido y exacto se muestra a menudo inapropiada para la evaluación de suelos debido a la naturaleza continua de la variabilidad de los suelos, a las dudas asociadas a la descripción del fenómeno en sí, a la imprecisión de las mediciones que ello conlleva, o a la incapacidad de formular adecuadamente las cuestiones. De todos modos, la eva-

luación de suelos que emplea estos modelos también está sujeta a las limitaciones de los datos y del conocimiento de partida al igual que el resto de los métodos.

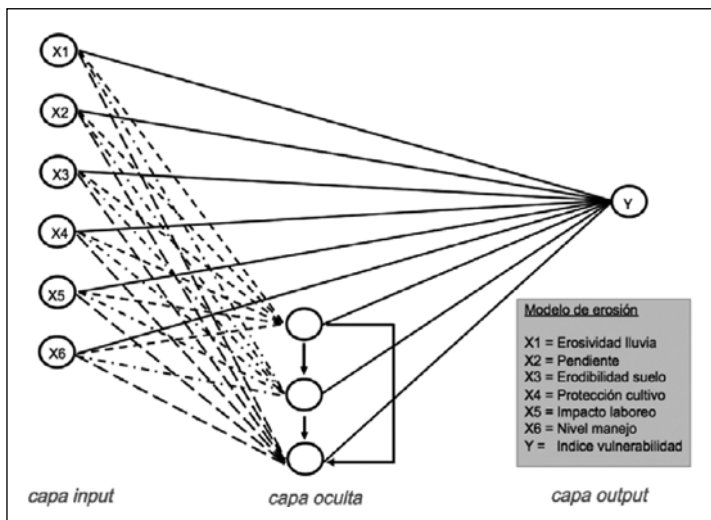
Por otro lado, la aplicación de los modelos de *red neuronal artificial* (“ANN: *Artificial Neural Network*”) en los procesos biofísicos ha crecido rápidamente en los últimos años. Sin embargo esta técnica basada en la *inteligencia artificial* surgió a principio de los años 1940, inspirándose en el funcionamiento de la *neurona* biológica del sistema nervioso, como célula especializada en detectar, procesar y transmitir información a otras células. Así, la neurona artificial se configura como una simple unidad aritmética que calcula su output sumando el peso de los distintos inputs y aplicando una transformación matemática o función de activación sobre dicha suma. La siguiente ecuación expresa matemáticamente el funcionamiento de las neuronas artificiales:

$$y = f(E x_i w_i + 0) \quad [6]$$

donde y es la señal output, x_i representa las diferentes señales inputs, w_i el peso asociado a cada input, 0 representa el error y f es la función de activación.

Las ANNs se componen de un grupo de neuronas artificiales conectadas unas a otras para ejecutar tareas complejas. Como se ilustra en la Figura 8, las ANNs incluyen tres secciones o capas: la capa input, con todas las neuronas artificiales que reciben inputs; las capas ocultas, que se corresponden con las unidades de procesamiento; y la capa output, como unidad de generación del output. Las características fundamentales de uno de estos modelos son el número de variables inputs, el número de variables outputs, el número de capas ocultas, el número de neuronas en cada capa, el peso inicial de cada neurona, y el número de ciclos y funciones de entrenamiento.

FIGURA 8
EJEMPLO DE RED NEURONAL PARA EVALUACIÓN DE SUELOS



Las ANNs han demostrado su capacidad a la hora de analizar sistemas no lineales de múltiples variables, de discriminar de forma bastante acertada entre la información real y el ruido, y de generalizar, es decir, de procesar patrones de entrada que no se hubieran presentado anteriormente, de una forma muy similar a como lo hace la inteligencia humana.

Al contrario que en los modelos estadísticos de regresión, estos modelos no requieren del conocimiento de las relaciones funcionales entre las variables de entrada y de salida. Además, las ANNs no son lineales, y por ello, pueden manipular patrones muy complejos de datos que imposibilitan el uso de otros métodos matemáticos. Otra ventaja se relaciona con los tipos de datos: continuos, casi continuos y categóricos o binarios que se pueden introducir sin que se transgredan las suposiciones del modelo. También se pueden utilizar en la modelización de fenómenos con múltiples resultados o variables de salida. Una vez que las fases de entrenamiento y de validación se han concluido, el algoritmo resultante se puede utilizar de forma fácil mediante aplicación automatizada desarrollando el correspondiente programa de ordenador³⁶.

Por su parte, los modelos de *simulación dinámica* (“*DS: Dynamic Simulation*”) describen de forma matemática los procesos biofísicos que tienen lugar en los ecosistemas agrícolas, tales como el crecimiento del cultivo, balance hídrico del suelo, movimiento de nutrientes, o erosión hídrica. Estos modelos mecanicistas o deterministas se aplican en la evaluación de suelos para cuantificar la producción de un cultivo, los efectos de la sequía, la pérdida de nutrientes o la del propio suelo, bajo las más diversas opciones de uso y manejo. Cuando se aplican sobre diversas unidades de suelo o a lo largo de varios años, se genera un conjunto consistente de datos sobre valores medios y su variabilidad en el espacio y en el tiempo.

La mayor limitación para la utilización de estos modelos *DS* es la necesidad de gran número de datos de entrada y, por consiguiente, la dificultad de calibrarlos y validarlos en nuevos espacios agro-ecológicos. Los modelos de simulación no suelen recoger todos los aspectos tratados en la evaluación de suelos, siendo aquellos que no contemplan los que menos varían con el tiempo, como es el caso de la rocosidad del suelo, el tipo de relieve o la fertilidad natural. No obstante, estos modelos proporcionan información detallada sobre los aspectos más dinámicos, tales como el régimen hídrico del suelo y sus consecuencias sobre el cultivo.

En los últimos años, la simulación dinámica de la contaminación en los sistemas suelo-planta-atmósfera ha progresado considerablemente a nivel local, por ejemplo en parcelas y estaciones experimentales o en pequeñas cuencas; sin embargo, su extrapolación al ámbito regional es aún una asignatura pendiente. Esta tarea de extrapolación puede investigarse por dos vías: a través de ‘*funciones de transferencia edafológica*’ que permiten estimar las variables de entrada de los modelos a partir de aquellas incluidas en las bases de datos regionales; o mediante el desarrollo de meta-modelos utilizando técnicas empíricas de evaluación de suelos que combinan los resultados de la aplicación de los modelos originales de simulación en zonas representativas con la información

36. D.R. Baughman, Y.A. Liu. *Neural Network in Bioprocessing*. Academic Press. 1995.

regional de esas zonas. En todo caso, los modelos DS y las técnicas empíricas de evaluación de suelos se están enriqueciendo mutuamente con excelentes resultados científicos y de aplicación, mejorando la precisión y aplicabilidad de los modelos resultantes³⁷.

Por último, en los sistemas híbridos (“*HM: Hybrid Model*”) de evaluación de suelos, mediante la vinculación de dos tipos de modelos, uno de ellos generalmente desarrolla las funciones de razonamiento cualitativo mientras que el otro simula la parte más cuantitativa de la modelización. Por ejemplo, algunos modelos híbridos demuestran que los resultados de la simulación dinámica pueden combinarse muy bien con los *sistemas expertos* en la evaluación de la producción de cultivos. De esta forma, se han obtenido modelos híbridos de árboles de decisión, algunas de cuyas ramas corresponden a predicciones cualitativas y otras a estimaciones cuantitativas obtenidas por simulación. Este enfoque de *modelización simulada-sistema experto* sería preferible al de los simples cálculos cualitativos, aunque no necesariamente todas las cualidades del suelo puedan ser analizadas mediante simulación dinámica. Igualmente, se han desarrollado también otros sistemas híbridos empleando árboles de decisión y redes neuronales artificiales para la evaluación del riesgo de erosión del suelo. Como ejemplo, el modelo ImpelERO, desarrollado por nuestro grupo de investigación³⁸, responde a un *HM, sistema experto/red neuronal*, en la modelización del complejo problema de la erosión de suelos. Con una muy buena capacidad de cuantificación y predicción, este *HM* explica las principales relaciones de los parámetros de entrada, sobre suelo, clima y manejo agrícola, y es capaz de reproducir con precisión la vulnerabilidad a la erosión de los suelos.

Memorias personales

Mi sensibilidad por la innovación y transferencia del conocimiento desde la ciencia a la práctica, se incrementó a través de una serie de experiencias concretas y extensas en el tiempo. La primera, a nivel internacional, fueron mis colaboraciones diversas con FAO, desde 1990 hasta 2003, en proyectos de armonización e informatización de datos de suelos que se plasmaron en el sistema de base de datos de perfiles de suelos FAO-CSIC:SDBm, ampliamente utilizado en numerosos países. El proyecto “SDBm: Multilingual Soil Profile Database” (coordinado por Jaques Antoine y Robert Brinkman) junto con el proyecto SOTER también de FAO, han sido dos iniciativas pioneras en el desarrollo de metodologías armonizadoras de la información de suelos, tanto de bases de datos como de documentos cartográficos, a nivel mundial.

En segundo lugar, mi participación en proyectos europeos, que se inició en 1986 y culminó en 2006, muy especialmente con referencia a la modelización biofísica e integrada del sistema suelo-uso, tanto en las condiciones socio-económicas actuales como en futuros escenarios de cambio global. Con financiación y coordinación de la DG-Agricultura, DG-Investigación y DG-Medio Ambiente de la CE, esta colaboración

37. C.A. Van Diepen et al. *Soil Use and Management* 5: 16-24, 1989.

38. D. de la Rosa et al. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 73: 211-226, 1999.

con los equipos europeos más relevantes sobre dicho tema científico, representó una experiencia profesional del mayor interés, que se plasmó en los proyectos de evaluación de suelos “ACCESS: Agroclimatic Change and European Soil Suitability” (coordinado por Peter Loveland, Silsoe), “IMPEL: Integrated Model to Predict European Land Use” (coordinado por Mark Rounsevell, Silsoe), “SIDASS: Spatially Distributed Simulation Model Predicting the Dynamics of Agro-physical Soil State within Europe Countries” (coordinado por Rainer Horn, Kiel) y “SCAPE: Soil Conservation and Protection for Europe” (coordinado por Anton Imeson, Amsterdam). También es de destacar mi colaboración con la Agencia Europea de Medio Ambiente, durante los años 1998 hasta 2002, liderando el Centro Temático de Suelos compuesto por un consorcio de ocho partners o centros relevantes de investigación en Europa. Los resultados tangibles de esta colaboración, junto con la ayuda facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente, se centraron fundamentalmente en el desarrollo del Sistema Español de Información de Suelos sobre Internet (SEIS.net). También es destacable entre estas experiencias europeas la organización, junto con la “Osterreichische Bodenkundliche Gesellschaft” (coordinado por Winfried Blum, Viena), de la excursión edafológica por Andalucía en memoria del Prof. Kubiena.

Sin embargo, los mejores resultados de nuestras colaboraciones europeas se plasmaron, junto con las aportaciones de otros muchos expertos, en un extenso documento técnico de apoyo a la Estrategia de Protección de Suelos auspiciado por la Comisión Europea (2004). En 2006, esta estrategia fue adoptada por la Comisión, aunque en 2010 fue bloqueado su desarrollo por varios países miembros, y recientemente (13 Febrero 2012) la Comisión ha hecho público un informe de implementación como Directiva Marco sobre el Suelo. Se trata de poner de manifiesto el deterioro continuado de los suelos, su gravedad, y la necesidad de tomar medidas más enérgicas y urgentes, tanto en la Unión Europea como en el resto de países. En la nueva reforma de la Política Agrícola Comunitaria (PAC, 2014-2020), se especifican ciertas acciones basadas en dicho informe técnico y que claramente apuntan en esta dirección.

7. SISTEMAS DE AYUDA A LA DECISIÓN

En la búsqueda de solución a un problema real, el conocimiento del futuro posible mediante el ejercicio de la predicción científica tal y como comentamos en el apartado anterior, representa el paso previo para tomar decisiones o dar pautas de actuación. Además, las pautas de actuación planificadas en base a las predicciones de futuro han de prever las consecuencias posibles (*Prevencion*; Kitcher³⁹).

En la actualidad, las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs), incluyendo la ingeniería de datos y conocimiento, ofrecen extraordinarias posibilidades tanto en el desarrollo como en la aplicación de los modelos predictivos. Sistemas de gestión de bases de datos geo-referenciados, algoritmos genéticos, siste-

39. Ph. Kitcher. *The Advancement of Science*. Oxford Univ. Press. 1993.

mas expertos, redes neuronales, redes bayesianas y herramientas de optimización, son algunas de las múltiples tecnologías que se utilizan con esta finalidad. Dentro de este contexto, los innovadores sistemas de ayuda a la decisión (“DSS: *Decision Support System*”) son plataformas computacionales interactivas que integran dichas tecnologías, con el fin de facilitar el proceso de toma de decisiones en la identificación y solución de problemas reales. El diseño clásico de un DSS incluye: un sofisticado sistema de gestión de bases de datos; un sistema robusto de aplicación de modelos predictivos; y una interfase de usuario que facilite las consultas, la creación de informes y la presentación gráfica y espacial de resultados⁴⁰.

Desde el punto de vista de la implementación y aplicación de los *sistemas integrados de evaluación de suelos*, las emergentes tecnologías DSS resultan también ideales para soportar la solución de estos problemas⁴¹. Conforme la preocupación sobre el uso sostenible de los recursos naturales es cada día más relevante, la necesidad de disponer de sistemas de ayuda a la decisión se hace más evidente. En la reciente publicación “*Decision Support Systems in Agriculture, Food and the Environment: Trends, Applications and Advances*”⁴² se revisa una veintena de estas novedosas herramientas que fueron desarrolladas para resolver problemas reales en el campo de la agricultura, la alimentación y el medio ambiente.

Como prototipo de un sistema integrado de evaluación de suelos, el sistema *MicroLEIS DSS*⁴³ (“Microcomputer-based Land Evaluation Information System”) responde técnica y globalmente al esquema de un sistema de ayuda a la decisión para la sostenibilidad del uso agrícola de los suelos. Las *bases de datos* del sistema *MicroLEIS DSS* facilitan el almacenamiento y manejo de la gran cantidad de datos básicos procedentes de los reconocimientos e inventarios de suelos, así como de los restantes factores adicionales, fundamentalmente, clima, y manejo agrícola. Esta información básica hace especial referencia a las variables de entrada de los diferentes modelos de evaluación. A su vez, el conjunto de *modelos de evaluación* de suelos que se integran en el sistema *MicroLEIS DSS* tratan del uso agrícola de las tierras, su ordenación y gestión, con el objetivo principal de proteger el propio suelo y el medio ambiente. Otros sistemas similares ponen especial énfasis en la producción de cosechas aunque también consideren la protección medio-ambiental (ej.: el “*sistema DSSAT*”⁴⁴ o el “*Electronic Field Office Technical Guides: eFOTGs*”⁴⁵).

En la aplicación de tales sistemas DSS, el objetivo final no es otro que el de generar nuevas hipótesis o escenarios de cambio que son comprobados en base a las observaciones de campo. Siguiendo estos esquemas integrados, el proceso de evaluación de suelos

40. J.P. Shim et al. *Decision Support Systems* 33: 111-126, 2002.

41. D. de la Rosa & C. van Diepen. *Qualitative and Quantitative Land Evaluation*. EOLSS-UNESCO. 2002.

42. B. Manos et al. (Eds.). *Decision Support Systems in Agriculture, Food and Environment*. IGI Global. 2010.

43. D. de la Rosa et al. *Environmental Modeling & Software* 19: 929-942, 2004.

44. J.W. Jones et al. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265, 2003.

45. USDA. *Electronic Field Office Technical Guides*. NRCS. 2004.

no determina en si mismo el tipo de uso o los cambios de usos, sino que proporciona los datos básicos en los que se deben basar las decisiones a tomar. Así, la evaluación de suelos resulta de la mayor utilidad tanto a nivel político (escala regional o generalizada), como a nivel técnico y de agricultor (escala local o detallada) a la hora de realizar elecciones acertadas entre los posibles usos y manejos alternativos. Todo este proceso confiere a los científicos del suelo –los edafólogos– un papel protagonista en la toma de decisiones sobre los cambios en el uso del suelo y sus impactos, a la vez que en la gestión y predicción de los efectos de la acción humana. Igualmente, con ello se pone de manifiesto la extraordinaria sinergia que se produce entre las tecnologías de la información y la gestión medioambiental en la búsqueda de un desarrollo sostenible.

Memorias personales

Desde principio de los años 1990s y como un proyecto abierto en el tiempo, el Grupo de Evaluación de Suelos del IRNAS que personalmente coordino desarrolla el sistema MicroLEIS, recogiendo e integrando los resultados científicos, básicamente bases de datos, modelos predictivos y otras herramientas informáticas, generados en proyectos previos. Desde sus inicios el desarrollo de este sistema ha seguido las transformaciones propias de las tres grandes etapas de la tecnología informática: 1) procesamiento de datos; 2) implantación de los equipos PC; y 3) conexión en red. Durante todo este tiempo es destacable la fecha de 9 de septiembre de 1998, cuando todos los componentes de MicroLEIS se colgaron en Internet a través del portal <http://www.microleis.com>. Desde ese año los usuarios de dicha tecnología crecieron exponencialmente, superando en la actualidad los 6.000 usuarios registrados y acercándose a las 120.000 visitas. Para situarnos en el tiempo, casi en esa misma fecha (27 de septiembre de 1998) dos estudiantes de la Universidad de Stanford, Larry Page y Sergey Brin, fundaron la compañía Google Inc., estrenando en Internet su extraordinario motor de búsqueda como principal elemento del actual universo Google.

En 2004 publicamos en la revista científica “Environmental Modeling & Software” el trabajo titulado “A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection” que desarrolla los principales componentes de esta metodología de evaluación agro-ecológica de suelos e integra en un sistema espacial de ayuda a la decisión. Durante estos más de 20 años de desarrollo de MicroLEIS, un gran esfuerzo se ha realizado para ir progresando desde un simple sistema de evaluación de la potencialidad de los suelos, a un sistema de información de recursos rurales, y hasta terminar en un sistema de ayuda a la decisión sobre la calidad agro-ecológica de los suelos.

Por último, en 2009 lanzamos una iniciativa empresarial, con la creación de la spin-off “Evenor-Tech”, para la explotación de la tecnología MicroLEIS y las bases de datos de SEISnet, siendo una de las primeras empresas de base tecnológica del CSIC. La internacionalización de la empresa, sobre todo a nivel europeo, con proyectos ya en desarrollo con diversos departamentos de la Comisión Europea, y de Hispanoamérica,

en especial con México y Argentina, se presenta como la más prometedora tendencia de desarrollo futuro. A través de su portal <http://www.evenor-tech.com>, el mayor interés y demanda de esta tecnología se pone especialmente de manifiesto, dadas sus posibilidades de adaptación a futuros escenarios de cambio climático y predicción de la capacidad de secuestro de carbono de los suelos.

8. PARADIGMA AGRO-ECOLÓGICO

Hasta aquí y una vez detallados los aspectos metodológicos más innovadores en evaluación de suelos, resulta lógico preguntarse sobre la utilidad de dichos desarrollos científicos. Desde finales de los tiempos de la Revolución Verde, principios de los años 1980s, se ha ido enfatizando la interacción entre la manera de hacer agricultura y la degradación medioambiental. A pesar de los aumentos espectaculares de cosechas conseguidos bajo el enfoque productivista de dicha revolución, los graves problemas ambientales también ocasionados se pusieron claramente de manifiesto. La preocupación de los científicos sobre estos problemas se observa por ejemplo en el incremento espectacular de las publicaciones sobre degradación del suelo⁴⁶. A su vez y en este caso concreto, la degradación del suelo se vuelve contra la propia capacidad productiva de las tierras. Lal et al.⁴⁷ pone de manifiesto esta interacción entre degradación del suelo y capacidad productiva, estableciendo tres fases o grados de gravedad, la última de las cuales considerada como irrecuperable para la producción de cultivos.

Ante esta evidencia, un nuevo enfoque o paradigma de progreso se ha ido abriendo camino: el *paradigma agro-ecológico*, combinando el tratamiento integrado de la agricultura con la *dependencia crucial del suelo*. Para ello, la mejor manera de explorar científicamente los límites agro-ecológicos de la sostenibilidad en el uso y gestión del territorio pasa, sin lugar a dudas, por la evaluación simultánea de las potencialidades y limitaciones de cada suelo. En este sentido, la predicción de la calidad global del suelo, como nuevo concepto surgido en la Ciencia del Suelo, se presenta como el mejor camino a seguir a la hora de dar solución a los verdaderos problemas reales. La importante degradación de los recursos naturales en general, ha hecho que el concepto de sostenibilidad global se haya convertido ya en un objetivo de consenso indiscutible para la comunidad internacional, incluyendo la agricultura como actividad relevante.

Bajo este enfoque agro-ecológico, la aplicación a una zona geográfica determinada del sistema de ayuda a la decisión MicroLEIS DSS puede resultar el mejor ejemplo sobre las acciones recomendadas en cuanto a uso y manejo sostenible de los suelos. Con ello se pone de manifiesto la importancia de utilizar la mayor información sobre los suelos para acertar en tales decisiones, aunque en estos estudios no se consideran los aspectos socio-económicos. Así se establecen a nivel regional estrategias de *segregación de tierras agrícolas, reforestación de tierras marginales, diversificación de cultivos e*

46. R. de Jong. *EUSS Bull* 118. 2010.

47. R. Lal et al. *Land Degradation and Development* 1: 51-69, 1989.

identificación de áreas vulnerables. Igualmente y a nivel local, se hace referencia al análisis de las prácticas de manejo como segunda fase después de la ordenación del uso de las tierras. Estas últimas decisiones se relacionan preferentemente con la restauración de la materia orgánica de los suelos, *la intensidad del laboreo, el tiempo de tempero, el tipo de maquinaria y la racionalización de los inputs* utilizados en la explotación.

También en la *aceleración del cambio climático*, se calcula que la agricultura actual genera del 20 al 30 % de las emisiones totales⁴⁸. Sin embargo, un uso y gestión adecuados de los suelos puede mantener e incluso incrementar su *capacidad de carga o secuestro de carbono*, aumentando a la vez la productividad agrícola. Por el contrario, medidas inapropiadas sobre los suelos pueden liberar a la atmósfera cantidades importantes de carbono. La incorporación al suelo de biomasa en forma de residuos agrícolas, es una de las medidas más adecuadas. Al mismo tiempo y dada la cada vez mayor escasez de petróleo, la industria energética y química trata de satisfacer sus necesidades a partir de la biomasa. Todo ello está generando conflictos con respecto al uso y manejo del suelo, aumentando las presiones sobre los ecosistemas agrícolas, por lo que se harán cada vez más imprescindibles los sistemas de ayuda a la decisión que respalden las discusiones sobre los acuerdos inherentes a estas situaciones.

En resumen, parece claro que el impacto ambiental de los cambios de uso y manejo del suelo, es razonablemente bien pronosticado por los sistemas agro-ecológicos de ayuda a la decisión, siendo éstas las tendencias recomendadas u objetivos a conseguir: incrementar la materia orgánica del suelo; reducir la erosión; mejorar la infiltración; aumentar la capacidad de retención de agua; disminuir la compactación; e impedir el lavado de agro-químicos hacia los acuíferos. En cuanto al impacto del cambio climático sobre los suelos, así como sobre su capacidad de secuestro de carbono, se obtienen también estrategias de respuesta. Sin embargo, la toma de decisiones en el contexto agro-ecológico es un proceso de gran complejidad que contempla múltiples criterios y muy diferentes tipos de información y conocimiento. Como uno de los más innovadores resultados metodológicos de la predicción científica, los sistemas de ayuda a la decisión no son pues una panacea, pero sí excelentes herramientas para trasvasar el conocimiento científico al mundo práctico, tanto resolviendo problemas como advirtiendo riesgos. En un sentido amplio, este nuevo enfoque agro-ecológico o multi-criterio se considera elemento central de una *Segunda Revolución Verde* que contemple tanto la ordenación global de la tierra, como del agua y de los recursos vivos. Lo cual conlleva la formulación de sistemas individualizados de uso y manejo agrícola de acuerdo con las potencialidades y limitaciones de cada tipo de suelo, tal y como se destaca en el título de este discurso.

9. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Permítanme ahora dedicar la última parte de mi intervención a comentar, aunque solo sea someramente, las perspectivas de futuro de la investigación en agricultura y,

48. IPCC. *Fourth Assessment Report: Climate Change*. Cambridge Univ. Press. 2007.

dentro de ello, al papel crucial que debe desempeñar el conocimiento del suelo. Desde el inicio de la crisis económica mundial (2008), se han ido poniendo aún más de manifiesto las múltiples decisiones equivocadas de la actividad humana que han causado durante el pasado siglo el mayor deterioro histórico de nuestro planeta. Junto con la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, ello ha afectado muy particularmente a la explotación de los recursos naturales. La importante degradación de estos recursos ha hecho que el concepto de *sostenibilidad global* se haya convertido ya en un objetivo de consenso indiscutible para la comunidad internacional, incluyendo la agricultura como actividad relevante. De todo lo anterior se deduce que el mundo está experimentando en la actualidad importantes cambios sociales y ambientales, muy particularmente en lo que respecta al uso y degradación de los suelos, por lo que se enfrenta a nuevos retos futuros que presentan una magnitud, velocidad e interconexión sin precedentes.

También en la Unión Europea, preferentemente a través de la próxima reforma de la PAC (Política Agrícola Comunitaria, 2014-2020), se apuesta de forma decidida por la ecologización de la agricultura; formando parte esencial de un desarrollo rural sostenible que contemple además el cambio climático en su doble vertiente de mitigación y adaptación, la gestión racional del agua y el apoyo a las zonas desfavorecidas con riesgo de abandono y desertificación. Se pretende un modelo de agricultura sostenible multifuncional con efectos positivos sobre la biodiversidad, compatibilizando la protección ambiental con los nuevos usos agrícolas, tal y como es la producción de biomasa como fuente de energía renovable. Desafortunadamente, reconociéndose el fuerte impacto que tiene la agricultura sobre la naturaleza, se considera que hasta el momento las políticas agrícolas de Europa no han cambiado lo suficiente como para reducir las pérdidas de biodiversidad y proteger el medio ambiente.

El mundo pues tiene planteado un serio problema de alimentación, cuya única forma real de resolverlo es haciendo más agricultura. Garantizar la seguridad alimentaria, pero también responder al boom de los biocarburantes y a la mitigación del cambio climático, son los grandes retos planteados. El aumento en la producción de alimentos vendrá determinada no solo por los millones de hambrientos, sino por la mayor demanda de los países emergentes como China y la India. Los nuevos usos industriales de las cosechas, que empezaron con la producción de etanol, se diversificaran hacia otras clases de biocombustibles o hacia los plásticos biodegradables. La agricultura pues tendrá que ser *multifuncional*, en el sentido de no solo producir alimentos, sino además contribuir a las demandas energéticas y a mitigar los impactos adversos del cambio climático, proporcionando oportunidades para el secuestro del carbono atmosférico. La consecuencia inmediata de todo ello ha sido la subida del precio de las cosechas, que muy probablemente se mantendrá en las próximas décadas. Con una agricultura más rentable, no serán tan necesarias las ayudas a la producción. Históricamente, la rentabilidad agrícola ha decrecido conforme la economía en general ha mejorado, y al revés. Sin embargo, reputados economistas pronostican que en los próximos años la agricultura se mantendrá en alza aunque la crisis económica se supere.

Dentro de este contexto global, el *suelo llegará a estar de moda* al ser elemento clave tanto en la protección del medio ambiente como en la garantía de la seguridad

alimentaria. Así pues, la *Ciencia del Suelo* tendrá un papel protagonista en la urgente transformación de nuestro planeta en un mundo realmente sostenible, donde habrá que ir dando solución a los grandes problemas de degradación ambiental, pérdida de biodiversidad, cambio climático y escasez de recursos, al mismo tiempo que se produce un fuerte incremento de la población mundial con mayores necesidades y expectativas.

Esta preocupación creciente sobre la integración de los estudios de suelos en un contexto de cambio global, se extiende actualmente a la manera científica de dar solución efectiva a los problemas planteados. Incluso algunos autores (ej.: McBratney⁴⁹) llegan a afirmar que el *auténtico conocimiento científico* en Edafología tiene que responder y dar solución real a los problemas. Se trata de partir de un problema concreto y buscar científicamente cómo resolverlo, en vez de desarrollar conocimiento para luego buscar dónde aplicarlo. A su vez, preocupa el dar la máxima utilidad a los conocimientos científicos ya elaborados sobre los suelos, como, por ejemplo, se puso de manifiesto en la elaboración del excelente documento técnico que sirvió de base para el lanzamiento de la futura “*Soil Protection EC Directive*”⁵⁰. Ello no justifica que los reconocedores de suelos estén actualmente en fase de extinción, lo que habrá que evitar a toda costa, al hacerse uso exclusivo de esa información ya elaborada junto con la procedente de la teledetección y las tecnologías GIS. Por el contrario, seguirán siendo imprescindibles los reconocedores de individuos-suelos capaces de llevar a cabo la descripción morfológica del perfil, su caracterización analítica, clasificación natural e interpretaciones prácticas sobre uso y conservación. En otras palabras, la verdadera Ciencia del Suelo seguirá teniendo sus raíces en la morfología, génesis, clasificación, cartografía y evaluación de los suelos.

El enfoque *agro-ecológico* para la sostenibilidad del uso y protección de los suelos, que ha representado el elemento central de este discurso, es actualmente y seguirá siendo en el futuro mucho más que una simple necesidad. Para tratar de superar dichos retos, se precisa más que nunca del caudal de conocimientos edafológicos ya elaborados, así como continuar la investigación en múltiples disciplinas complementarias, tales como tecnología de suelos, innovación agro-ecológica, planificación regional o conservación de la biodiversidad. En todo caso, es también de destacar la nueva tendencia sobre la importancia metodológica de la predicción científica para tomar decisiones o dar pautas de actuación en la solución de los verdaderos problemas reales.

Obviamente, este nuevo enfoque multi-criterio tendrá que dar cabida a los grandes avances que se viene produciendo en *otros campos de la agricultura*, tales como el uso de agroquímicos para abonado y control de plagas; los sistemas de aplicación del agua de riego; y las innovaciones biotecnológicas aplicadas en cultivos genéticamente modificados, en explotación biológica de nutrientes o en bio-recuperación de suelos contaminados. Todos estos avances colaterales de la tendencia agro-ecológica fueron anteriormente comentados en el capítulo de experiencia práctica agrícola. También, la evaluación de la calidad del suelo basada en indicadores biológicos que ofrecen una

49. A. McBratney. *New IUSS Officers*. IUSS Bull. 117. 2010.

50. EC. *Reports of the TWG for the Thematic Strategy of Soil Protection*. EUR 21319 EN. 2004.

mayor sensibilidad a los cambios de manejo agrícola, tendrá que ser integrada en los esquemas de evaluación agro-ecológica de suelos⁵¹. Como consecuencia de todo ello, el *tratamiento individualizado* será esencial en la agricultura moderna. Dada la extraordinaria complejidad y variabilidad de los suelos, la observación individual de cada uno de ellos será imprescindible para establecer el diagnóstico más preciso y poder así recomendar el mejor uso y manejo.

En cuanto a la caracterización detallada del *suelo ideal para cada tipo de cultivo*, como objetivo fundamental de la evaluación de suelos agrícolas, habrá que tener en consideración que actualmente son solo 150 especies vegetales las que se cultivan a nivel comercial, destacando el trigo, el arroz y el maíz. Aunque, según FAO, son más de 7.000 las plantas que han cubierto las necesidades humanas a lo largo de la historia, y más de 30.000 las especies vegetales comestibles identificadas. Por consiguiente, queda mucho que investigar sobre esa idealidad de los suelos, al igual que sobre la mejora de esos miles de cultivos infrautilizados para adaptarse a suelos específicos de determinadas zonas.

Incluido en este *período integrado* de la Ciencia del Suelo, actualmente abanderao entre otros autores por Sánchez⁵² y Upoff⁵³, se pueden considerar estos dos grandes proyectos: uno a nivel mundial “*IUSS Digital Soil Mapping*” (<http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/dsm>), y otro a nivel europeo “*Inspire EC Directive*” (<http://inspire.jrc.ec.europa.eu>), los cuales tratan de crear extensas infraestructuras mediante recopilación de información espacial con el fin de resolver problemas concretos y soportar políticas con relación al suelo y al medio ambiente. Sin lugar a dudas, ambas infraestructuras digitales representarían plataformas ideales para fomentar el desarrollo y aplicación de metodologías predictivas sobre degradación del suelo, y en escenarios futuros de cambio global. Europa ya cuenta con muchas ventajas por haber sido pionera en muchos ámbitos, como los de la reducción de la contaminación atmosférica, la gestión del agua y las aguas residuales, las tecnologías eficientes en el uso de los recursos, etc. Igual ocurre con la legislación ambiental y la realización de informes periódicos. Además, se dispone de las mejores fuentes y tecnologías de la información y la comunicación para desarrollar *flujos o plataformas de información*, que apoyen los objetivos ambientales. Sin embargo, las restricciones de acceso a los datos, el cobro de tasas o los derechos de propiedad intelectual hacen que dichos datos no siempre sean fácilmente accesibles.

Esta nueva tendencia integradora será posible gracias al arrollador avance que se viene produciendo en las *tecnologías asociadas a la ciencia de la información*. Conocimiento científico y experiencia práctica se podrán combinar de múltiples maneras mediante el uso de estas tecnologías (GIS y DSS), consiguiendo modelos predictivos y otras aplicaciones computacionales de la mayor utilidad. Como consecuencia de ello, el uso y gestión integrada de los ecosistemas agrarios se beneficiarán de potentes herramientas de análisis y síntesis del universo de datos que se deriva de la complejidad y variabilidad de estos ecosistemas. Además, la consideración del factor suelo como

51. D. de la Rosa. *Land Degradation & Development* 16: 551-559. 2005.

52. P.A. Sanchez. *Trans. 15 World Congress of Soil Science*. 1994.

53. N. Uphoff et al. (Eds.). *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. CRC Press. 2006.

elemento vertebrador de este enfoque agro-ecológico añade una complejidad adicional. No obstante, se confirma ésta como la única forma de que rentabilidad económica y protección ambiental puedan ir de la mano, permitiendo la combinación del conocimiento científico y de la experiencia práctica en el proceso de *predicción y toma de decisiones* para un verdadero desarrollo sostenible de la agricultura. También y sobre dichas infraestructuras digitales que se encuentran ya en desarrollo, resulta prioritario hacer aplicación de las últimas tecnologías, tales como las redes inteligentes, la computación en nube y los sistemas móviles de información geográfica.

Por último, quiero terminar este discurso subrayando, subrayando tal y como en la actualidad lo vienen haciendo otros autores, la necesidad de reformar el actual sistema de I + D ante la escasez de verdaderos descubrimientos en las ciencias aplicadas, y con el fin de generar realmente el conocimiento necesario para implementar un nuevo modelo productivo. Además de modificar el procedimiento de evaluación de los resultados científicos y con especial referencia a la Ciencia del Suelo, este radical cambio tendrá que ver también con el principio holístico de *“el todo es mayor que la suma de sus partes”*. Para que la Ciencia del Suelo desempeñe un papel crucial en la Agricultura, la visión global del sistema-suelo se ha de imponer sobre los estudios aislados de las diferentes sub-disciplinas. Viene al caso recordar al prestigioso Prof. Kubiena que en su libro *“Claves Sistemáticas de Suelos”*⁵⁴ destacaba algo que todavía hoy sigue teniendo plena vigencia y que habría que superar en el futuro, decía: *“La Edafología actual ha dominado de manera brillante el análisis, pero en la síntesis está todavía en sus principios. Actualmente es más una ciencia de muestras de suelo que una Ciencia del Suelo. A pesar de todas las finuras de los métodos de análisis, el conocimiento íntimo de las formaciones edafológicas, consideradas como una totalidad, prospera sólo lentamente”*. Sirvan las acertadas palabras de Kubiena como refuerzo de las principales ideas expuestas en este discurso.

Y nada más. Agradezco de nuevo a quienes me eligieron para estar hoy aquí, también a quienes me ayudaron en el camino, muy especialmente a mi familia y a mis maestros, y a todos ustedes por la atención prestada.

Muchas gracias.

54. W. Kubiena. *Claves Sistemáticas de Suelos: Introducción*. CSIC. 1952.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL ILMO. SR. D. GUILLERMO PANEQUE GUERRERO

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario,
celebrado el día 13 de mayo de 2013.*

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Excmas. e Ilmos. Autoridades y Representaciones, Excmos. e Ilmos. Srs. Académicos, Sras. y Sres.:

Quiero manifestar, en primer lugar, a todos los Miembros de la Real Academia Sevillana de Ciencias y, de modo especial, al Excmo. Sr. Presidente de la misma, mi agradecimiento por la honrosa distinción que me conceden con el encargo de contestar al Discurso protocolario de entrada en esta Real Academia Sevillana de Ciencias del Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta, Profesor de Investigación del CSIC, en Sevilla.

También quiero manifestar que no ha sido, ciertamente, tarea fácil para mí realizar esta labor, por diversos motivos; entre ellos, el haberme dedicado en los últimos años, como investigador, preferentemente, a otros campos de la Ciencia del Suelo y de la Química Agrícola. Y no menos importante es por la responsabilidad personal que asumí –hace ya 40 años– en el proyecto y dirección de la Tesis Doctoral del Ingeniero Agrónomo D. Diego de la Rosa Acosta.

He de decir que siento complacencia en contestar el *Discurso* del Ilmo. Prof. Dr. D. Diego de la Rosa Acosta, tan equilibrado de ciencia, técnica y sentimientos que, a veces, “*solo encuentro salida por las estrellas*”, como la Granada de Carlos Cano, al sentirme prisionero de mi honrosa obligación ante tan distinguido auditorio.

Por estas y otras consideraciones –entre ellas, nuestra franca y fraternal amistad– me encuentro ahora satisfecho de los muchos e ilusionados objetivos, ideas y metas científicas pensados en su día para introducir en el nuevo campo –hoy disciplina– de la *Evaluación de Suelos* a futuros edafólogos españoles, según entendían entonces dos jóvenes, uno, recién Titulado en la ETSI Agrónomos de Madrid; otro, Investigador Científico, Jefe de la Sección de Suelos del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto de Sevilla (CEBAC, posteriormente Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS), ambos, con la firme y confiada aceptación del Prof. Dr. D. Francisco González García, cuya memoria permanecerá en la Historia de la Universidad de Sevilla, en la de esta Real Academia Sevillana de Ciencias (RASC), de la que fue Presidente, en la del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y en la de sus numerosos colaboradores, alumnos y amigos.

El nuevo Académico Numerario nació en Pilas, y creció en el seno de una familia numerosa; la de D. Juan y Dña. María –que bien recuerdo de cuando vivían entre nosotros–, y la de sus nueve hermanos; de ellos, dos me honran al ser sobresalientes discípulos míos, y otro, el mayor, compañero en tareas docentes del Doctorado.

Diego de la Rosa estudió, y conoce bien, los suelos de Pilas; a él y a mí, J. L. Mudarra nos llevó a reconocer los de El Aljarafe. No pretendo un discurso geórgico, pero sí puedo afirmar que no ocultaré, en modo alguno, mi amor por el campo, que, como el Dr. de la Rosa, también recibí de mis mayores.

En el año 1975 –tan especial para los dos–, Diego de la Rosa, que desde antes ya era Ingeniero Técnico Agrícola, fue distinguido en la ETSIA de Madrid, como Sobresaliente Doctor Ingeniero Agrónomo. Este alto nombramiento académico vino a completar otro que ya tenía desde 1974, y mantuvo hasta 1981, el de Titulado Superior Especializado del CSIC en el CEBAC de Sevilla.

Con posterioridad a su doctorado, fue durante 1976-1977 Profesor Visitante en el Departamento de Ciencia del Suelo de la Universidad de Florida, Gainesville, EEUU, disfrutando una beca Fulbright; después, Investigador Científico del CSIC de 1981 a 1985; Jefe de la Sección de Conservación de Suelos de 1982 a 1984, y Jefe del Servicio de Evaluación de Recursos Naturales (1984-1988) de la Junta de Andalucía. Es, a partir de 1985, Profesor de Investigación del CSIC; y ha sido Director del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, de 1994 a 1998; y Director, en la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), del Centro Temático Europeo de Suelos (ETC/ Soil), con sede en Sevilla y Copenhague, de 1998 a 2001.

De todo ello, es destacable la capacidad científica del Prof. De la Rosa para recorrer en tan solo 11 años (1974-1985) las diferentes categorías de las escalas técnica y científica del CSIC, desde Titulado Superior Especializado a Profesor de Investigación. Su capacidad de gestión pública, desarrollada tanto en la administración regional como en la nacional y europea, a lo largo de 14 años, es igualmente digna de mención y elogio por los logros conseguidos.

A resultas de la información anteriormente resumida sobre nombramientos conseguidos y actividades desarrolladas, y de la valía de su *Discurso leído* –que contestaré en breve y brevemente– estoy seguro de anticipar que el Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta es muy bien recibido en esta RASC como Académico Numerario.

El nuevo Académico ha desarrollado su labor investigadora científica y técnica en las siguientes principales líneas de estudio, dentro de la disciplina *Evaluación de Suelos* que forma parte de la *Ciencia del Suelo*:

- Reconocimiento y Cartografía de Suelos,
- Productividad Agrícola de Suelos,
- Calidad de Suelos y Sostenibilidad,
- Riesgo de Degradación de Suelos,
- Armonización de datos básicos y, también, sobre
- Modelización del Sistema Suelo-Uso-Protección.

Conforme a esta temática y resumiendo su extraordinario *Curriculum*, la actividad en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) se centra preferentemente en su participación en 38 Proyectos de Investigación, más del 73% de los mismos relacionados con algunas de las líneas antes reseñadas. La mayoría de estos proyectos financiados por la Comisión Europea, organismos internacionales como FAO y UNESCO, y algunas empresas privadas.

Su producción científico-técnica comprende 9 libros; más de 150 trabajos originales entre capítulos de libros, artículos en revistas y estudios de divulgación; 50 mapas de suelos a diferentes escalas; y 14 marcas registradas. Posee alrededor de 100 comunicaciones a congresos nacionales e internacionales; habiendo impartido más de 40 cursos, seminarios o conferencias invitadas, y dirigido 20 titulaciones académicas entre tesis doctorales, tesis de máster y proyectos fin de carrera. Posee numerosos méritos y reconocimientos.

De estos excelentes resultados científicos del Prof. Diego de la Rosa destaca su acertada diversidad: no solo lo componen *artículos o "papers"*, sino también *libros, mapas, bases de datos, modelos y spin-offs*. Igualmente, es destacable su internacionalización ya que tales resultados los obtuvo con la colaboración de más de 90 investigadores procedentes de 35 países de todo el mundo.

De la vertiente cartográfica del nuevo Académico merece especial mención su participación, junto con los Profs. Roquero, Ontañón, Nieves y otros, en la elaboración del *Atlas Nacional de España: Mapa Edafológico*, escala 1/2.000.000, que publicó el Instituto Geográfico Nacional para conmemorar las efemérides del año 1992. Se trata del más completo y preciso mapa nacional de suelos, en formato impreso y electrónico, de acuerdo con los criterios del sistema de clasificación "U SDA Soil Taxonomy".

Entre las *bases de datos* es de destacar la llevada a cabo mediante la recopilación, armonización e informatización del extraordinario volumen de datos históricos de suelos generados en el IRNAS a lo largo de más de 40 años. Esta ingente labor de numerosos colaboradores, coordinados por el Prof. De la Rosa, permitió la elaboración de diversos bancos de datos que almacenan cientos de miles de registros geo-referenciados, datos de campo y de laboratorio, sobre más de 1000 perfiles de suelos y 15.000 sondeos.

Los numerosos *modelos predictivos* de la capacidad de uso agrícola de los suelos y su riesgo de degradación, desarrollados por el nuevo Académico y su grupo de investigación, forman parte como componentes de una innovadora metodología de evaluación agro-ecológica de suelos: el sistema espacial de ayuda a la decisión MicroLEIS. El alto nivel de aceptación nacional e internacional de esta tecnología queda reflejado en los más de 6.000 usuarios registrados, hasta la fecha, a través de Internet.

Por último, tanto la extensa infraestructura digital o bases de datos como la novedosa tecnología MicroLEIS, como se detalla en su último libro "*Evaluación Agro-ecológica de Suelos: para un desarrollo rural sostenible*", permitieron la creación de una de las 37 empresas de base tecnológica (*spin-off*) del CSIC: Evenor-Tech SL, actualmente en explotación.

Iniciando propiamente la Contestación al Discurso protocolario del Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta, que acaba de leer, quiero resaltar, en primer lugar, su amplio,

complejo y atractivo enunciado, en sí mismo, resumen comprensivo del tema que ha desarrollado de modo tan interesante, personal y directo el nuevo Académico Numerario.

En su *Discurso*, el nuevo Académico incluye con naturalidad y sencillez algunas *Memorias personales* que vienen a representar un agradecido y emotivo resumen de sus estudios y trabajos de investigación en diversos Centros Docentes, Instituciones Científicas y Departamentos de la Administración, en relación con la Agronomía y la investigación científica de los suelos.

- En la Escuela de Peritos Agrícolas del Cortijo de Cuarto, Sevilla.
- En la ETS de Ingenieros Agrónomos de Madrid.
- En el CEBAC de Sevilla, iniciando sus trabajos de campo y gabinete con el añorado Prof. J. L. Mudarra.
- En la Estación Agronómica Nacional de Oeiras, Portugal, con el destacado Prof. Dr. J. C. Cardoso.
- En el Departamento de Suelos de la Universidad de Florida, EEUU, donde tuvo la oportunidad de participar en las actividades del mítico *Soil Conservation Service*, conocer a los responsables del *Soil Survey* y a los impulsores del recién aparecido Sistema de Clasificación de Suelos –*USDA Soil Taxonomy*– liderados por el prestigioso Prof. Guy D. Smith.
- En la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, donde llevó a cabo una extraordinaria labor de recopilación y armonización de datos ambientales –pone en “formato útil” como a él le gusta decir–, con especial referencia a los suelos andaluces, y en parte reflejada en dos publicaciones que se han convertido en clásicas en su materia y de consulta obligada: “*Catálogo de Suelos de Andalucía*” y “*Evaluación Ecológica de Recursos Naturales de Andalucía*”.
- Por ultimo con varios departamentos de la Comisión Europea (CE) y en la Agencia Europea de Medio Ambiente, Diego de la Rosa relata sus numerosas experiencias profesionales que en síntesis quedaron reflejadas en la voluminosa documentación científico-técnica que soporta la Directiva Marco de Protección de Suelos, aun en proceso de implementación por parte de la CE.

D. José María Albareda, en 1940, escribía que “en el desarrollo de las Ciencias de la Naturaleza hay un continuo más allá, una permanente posibilidad de progreso, porque siempre quedan cosas por ver, y porque siempre quedan nuevas maneras de ver; siempre existen hechos y perspectivas por divisar y modos distintos de enfocarlos”. Se refería a las investigaciones micromorfológicas del Prof. Dr. Walter L. Kubiëna sobre El Suelo en las etapas de su Formación y Desarrollo, con especial énfasis en los Aspectos Biológicos –un conjunto de temas y enfoques concretos, expuestos a sus alumnos del Instituto de Edafología de Madrid–. Los estudios mencionados incluían importantes cuestiones metodológicas seleccionadas de su “*Tratado Fundamental*”, publicado en Ames, EEUU, en 1938: “*Micropedology*”. Como es bien conocido, posteriormente,

en Madrid, el CSIC publicó en 1953, en español y en inglés, las “*Claves Sistemáticas de Suelos*” (*The Soils of Europe*). En su época, una sistemática de los suelos de gran influencia a nivel internacional.

En 1993, el Prof. E. Cobertera en su tratado de “*Edafología Aplicada*” manifestaba que “la *Ciencia del Suelo* presenta una gran diversidad de métodos y criterios, posiblemente, relacionada con el gran número de colectivos científicos interesados en el mismo”. Igualmente, los Profs. Porta, López-Acevedo y Roquero vinieron a destacar esta circunstancia en su libro “*Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*”.

Nosotros mismos no pudimos sustraernos, al comienzo de la década de los setenta, a la nueva tendencia u orientación en los estudios edafológicos americanos y europeos –especialmente, franceses–, de completar la descripción, el análisis y la cartografía de los suelos (*Reconocimiento*) con una *Evaluación* de los mismos para distintos usos o aplicaciones.

Con la llegada, en aquella década de los setenta, de un joven Ingeniero Agrónomo, comenzó en el CEBAC un extraordinario desarrollo de esta rama de la Ciencia y Tecnología del Suelo, que posee actualmente alta aceptación internacional. Una rápida mirada a la bibliografía de entonces y a la actual sobre Evaluación de Suelos, confirma plenamente el gran acierto en la “implementación temprana de estos estudios” en la Sección de Suelos del CEBAC; y la posición destacadísima que, a nivel internacional, posee el Diego de la Rosa, responsable directo de esta situación.

Por entonces, dos aspectos nuevos del estudio de suelos reclamaban nuestra atención: la Morfología, Génesis y Clasificación de los de terrazas fluviales, y el de su Evaluación para distintos usos, todo ello como complemento y/o ampliación de los estudios de Suelos de Campiña, Marismas y Forestales que se desarrollaban en el CEBAC, y que tanto interés tendrían posteriormente en los “*Estudios Agro-biológicos Provinciales de Sevilla, Cádiz y Córdoba*”.

Los estudios sobre suelos que se realizaban en el CEBAC -CSIC- de Sevilla eran conocidos por miembros de la *Confederación Europea de Sociedades de Ciencias del Suelo* (ECSSS), cuyo Presidente, el Prof. Dr. Winfried E. H. Blum, tuvo la idea y gentileza de celebrar en Sevilla, año 2000, una *Reunión Científica* para conocer algunos de los más representativos suelos de Andalucía estudiados por el Prof. Dr. Walter L. Kubiëna, investigadores del Centro y discípulos del citado Profesor.

Era entonces director en Sevilla del *Centro Europeo de Suelos* (ETC/Soil) el Prof. Diego de la Rosa y algunos de los que intervinimos en campo en la descripción, interpretación de la génesis y clasificación de los perfiles de suelos seleccionados, tuvimos la ocasión de agradecer a los Drs. Blum y De la Rosa aquella interesante reunión.

También merece especial mención la *Reunión Científica Europea* (“Seminar on Land Evaluation in Mediterranean Regions”) organizada en Sevilla por el Prof. Diego de la Rosa, en 1987 recién incorporada España a la entonces Comunidad Económica Europea (CEE), a través de la cual los responsables científicos de la Dirección General de Agricultura de la CEE querían conocer el nivel y disponibilidad de la información de suelos en nuestro país.

En aquella reunión, siendo entonces Diego de la Rosa Jefe del Servicio de Evaluación de Suelos de la Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, destacaron las ponencias presentadas por los representantes españoles Profs. F. González García, J. Torrent, C. Roquero, J.L. Mudarra, M. Donezar y yo mismo, así como las intervenciones de los científicos europeos invitados por la CEE Profs. W. Verhey, M. Bornard, T.R. Harrod, J. C. Cardoso, D. Magaldi, J. Bouma, J. Lee, R. Dudal y L. Menanteau. Igualmente, llamó la atención la exposición paralela de numerosos mapas e imágenes de satélite, a nivel provincial y regional, elaborados en el mencionado Servicio. La reunión finalizó con una inolvidable excursión a las Marismas del Guadalquivir y Doñana que organizó el recordado ingeniero D. Ricardo Grande Covián.

Con referencia también a suelos de nuestro entorno próximo, deseo mencionar la *Reunión Científica* que, con anterioridad, tuvo lugar en Sierra Morena Occidental, organizada con motivo de la asistencia a Sevilla de dos colaboradores directos del Prof. Kubiëna, el Dr. Beckmann y la Dra. Geiger, movidos por el interés de conocer directamente los Suelos bajo Bosques de Sierra Morena Occidental, que habían sido estudiados en 1968 por el discípulo del Dr. Kubiëna, en Sevilla y Reimbeck, Dr. N. Bellinfante Crocci, colaborador en la Sección de Suelos del CEBAC.

Parafraseando a Machado y a García Barbeito, “Cuando se camina, se hace camino al andar”. Cuando haces caminos con otros, se hacen también amigos al andar. Y si caminas con discípulos por veredas y sendas –de riberas, vegas, terrazas, campiñas, montes, bosques...–, y miras, y contemplas distintos paisajes; y estudias y describes nuevas tierras y suelos –y plantas, cultivos, árboles...– haces, también, magisterio científico, y despiertas vocaciones al mismo tiempo que se establecen entre todos lazos permanentes de amistad.

Si más tarde, alguno de ellos hace reconocimientos de suelos, tierras, rocas, plantas y cultivos que antes habían sido estudiados por otros –tal vez, siguiendo métodos y criterios entonces adecuados para obtener valiosos resultados–; y se confirman, amplían o modifican las conclusiones, sientes como si la mente y el corazón se engrandecieran y dilataran, abriéndose y fortaleciéndose, al mismo tiempo, con estos estudios y resultados.

Así, el *oficio* de estudiante –que ya es *Maestro* de otros– es muy novedoso, importante y profundo; y le permite retener, imborrables en la memoria, interesantes y gratos recuerdos. Parecería como si, con la realización de aquellos caminos –de suelos y tierras–, se subiera a mágicas atalayas con el poder dichoso de conocer, respetar y amar más otras tierras, plantas, suelos, personas...

Gracias, Ilmo. Sr. Académico, y gracias, Excmo. Sr. Presidente, por permitirme recordar algunos caminos recorridos con compañeros y alumnos a la región –y a otras– donde el Prof. Diego de la Rosa tuvo sus primeras vivencias con el medio rural, como ha manifestado en su *Discurso*, a veces, con cierta nostalgia.

La comarca de El Aljarafe y sus tierras, ya en el entorno de Doñana, fueron foco de atracción para colaboradores y discípulos del Prof. Albareda Herrera, quienes la recorrieron para estudiar suelos, vegetación, geomorfología, sedimentología, explotaciones agrícolas, etc, aparte de otros muchos temas que, concretamente, hacen referencia a diversos aspectos del citado Parque Natural de Doñana, cuyo primer director fue el Dr. José A. Valverde.

Entre aquellos colaboradores y discípulos, recuerdo a los Drs. Chaves Sánchez y Martín Martínez, quienes participaron intensamente en el estudio y aplicación de las turbas de Mazagón a los cultivos de fresa de Huelva. También tuve la oportunidad de conocer en la citada región los trabajos sedimentológicos del Dr. J. Oriol Rivas y de la Dra. J. Pérez Mateos.

Acompañé al Dr. S. Rivas Martínez en algunos de sus estudios geobotánicos en el Llano de Huelva. Y estuve muchas veces en estos campos con el Dr. A. Guerra Delgado –el más destacado colaborador en *Cartografía de Suelos* de los Prof. Albareda, Hoyos y González–.

Dicha comarca de El Aljarafe, de la que forma parte el término municipal de Pilas, constituye por circunstancias geomorfológicas, climáticas, de suelos y agrícolas, uno de los territorios de investigación y docencia en el marco de los Cursos Internacionales de Suelos para países Americanos, patrocinados por CSIC, UNESCO, OEA, IEH, y las Universidades de Sevilla y Granada. Cursos en los que el Prof. De la Rosa participó activamente con el Dr. J. L. Mudarra Gómez, y cuyos resultados en la citada zona quedaron recogidos en la publicación “*Reconocimiento, Cartografía y Evaluación de Suelos de El Aljarafe*”.

Estoy muy satisfecho de haber dirigido las Tesis Doctorales de N. Bellinfante Crocci (“*Caracteres Químicos, Morfológicos, Mineralogía y Génesis de los Suelos de Sierra Morena Occidental*”, 1968), J. Olmedo Pujol (“*Contenido, Forma y Distribución del Hierro en Suelos de Andalucía Occidental*”, 1970), L. Clemente Salas (“*Propiedades, Génesis y Clasificación de Suelos de Terrazas del Guadalquivir*”, 1973), J.L. Mudarra Gómez (“*Estudio de los Suelos de la Cuenca del Guadalquivir*”, 1974) y de Diego de la Rosa Acosta (“*Reconocimiento y Evaluación de Suelos de Terrazas del Guadalquivir*”, 1975), el nuevo Académico, y otros más que figuran a continuación en mi discurso escrito.

Los “*Suelos del Valle del Guadalquivir (zona Posadas-Fuente Palmera)*” fueron estudiados por M. Medina Carnicer (1975); y el “*Estudio de Suelos de Terrazas del Guadalquivir*” fue tratado por C. Baños Moreno (1975). El “*Estudio Micromorfológico de Suelos de la Sierra de Francia (Salamanca)*” lo realizó C. Espino Gonzalo (1976).

Los “*Suelos de la Sierra del Pinar de Grazalema*” los estudió L. Corral Mora (1978), en la Universidad de Córdoba. Los estudios de “*Alteración de Rocas y Formación de Suelos, en el área de Riotinto*”, los realizó J. Heredia Moreno (1978); y el “*Reconocimiento y Fertilidad de los Suelos del Valle del Guadalquivir, en la zona ElCarpio-Lopera*”, lo llevó a cabo R. Navarro Bogallo (1981). Las “*Pizarras Arcillosas de Córdoba*” fueron objeto de estudio de J. L. Tirado Coello (1982) y la “*Materia Orgánica de los Suelos Forestales de Grazalema*”, de J. Mérida García (1983), mientras

que J. L. González Fernández (1983) estudió la “*Materia Mineral de los Suelos Forestales de Grazalema*”.

Los “*Parámetros Químicos de la Materia Orgánica de Suelos bajo Abetos y Cedros de Montañas Circunmediterráneas*”, fueron estudiados por M. S. Marín Moral (1984). El “*Reconocimiento y Evaluación de Suelos del Valle del Guadalquivir (Jaén)*”, fue objeto de estudio de J. Gil Torres (1985), y el de los “*Suelos del Valle de los Pedroches*” lo llevó a cabo J. M. Recio Espejo (1985). C. Pérez de Siles (1989) realizó el estudio “*Oligoelementos (Fe, Mn, Cu, Zn) en Suelos del Valle del Guadalquivir, Zona El Carpio-Lopera*”. Los “*Suelos de Áreas Vitivinícolas Andaluzas*” fueron tratados por M. L. Mato Iglesias (1999), P. I. Paneque Macías (2000), P. C. Osta Fort (2002). I. Gómez Parrales (2004) estudió los “*Suelos del Parque Natural de Los Alcornocales*”. Siempre recordaré con mucho agradecimiento al Personal Técnico que me prestó su extraordinaria colaboración en todos estos estudios: los Sres. M. Roca, A. Parejo y J. A. Moreno.

Volviendo a los comienzos de la *Evaluación de Suelos* con fines agrícolas, se trata en realidad de valorar su productividad o capacidad de producir plantas y/o cultivos. Con tal finalidad, se precisa establecer una clasificación técnica o práctica de suelos. Hay que tener presente que clasificar suelos es una tarea muy diferente y mucho más compleja que la que se requiere para clasificar individuos del Reino Vegetal o Animal. Entre otros motivos, porque en suelos no existen límites netos; se presentan como un continuum en el paisaje y, por consiguiente, la taxonomía no puede ser rígida. En todo caso, el artificio o clasificación técnica de suelos es tanto más útil cuanto mejor sirva a los propósitos para los cuales se pensó o se usa.

El aspecto práctico o técnico de evaluar la capacidad productiva de un suelo respecto a un cultivo, se planteó por los agrónomos como una metodología racional y compleja, que puede situarse en los comienzos del siglo pasado. Así, por ejemplo, según G. André (“*Química Agrícola*”, 1924), el agrónomo alemán Hazard había planificado en una región del Reino de Sajonia distinguir la adecuabilidad de las plantas del gran cultivo y los árboles forestales en distintas zonas o áreas, según sus exigencias en agua.

En 1909, Hazard partía de la base de que, para la producción de un kilogramo de materia seca, los vegetales necesitan disponer de una cantidad de agua que oscila entre 300 y 700 kilogramos, un margen realmente muy amplio. Para Hazard, las plantas del gran cultivo se pueden ordenar del modo siguiente, por orden de sus exigencias hídricas crecientes: patatas, centeno, avena, trébol encarnado y cebada, trigo y remolacha. Tenía en cuenta también que, junto al agua, desempeña un papel muy importante en la producción de materia seca, la temperatura media anual en el área de cultivo.

Consiguió conocer por medio de análisis físicos, la naturaleza y las proporciones de los elementos que determinan la distribución del agua en el suelo. Para ello, Hazard establecía en la región de estudio un *mapa litológico* que informa sobre la estructura geológica del suelo; un *mapa de suelos*, fundado en el anterior, en el que figuran propiedades físicas, pendiente del terreno, condiciones climatológicas y los datos del cultivo

que proporciona la práctica y los ensayos de laboratorio (Hazard, *Landw. Jahrb.*, XXIX, 805; 1909), citado en G. André (1924).

Se decía entonces que, si en una comarca existen tierras de trigo, tierras de remolacha, tierras de patatas, etc, se puede informar por adelantado cuál es la planta que conviene cultivar de preferencia y con la que se obtendrían los mejores y satisfactorios resultados, tal como puede deducirse a partir de un conjunto de datos que se completan mutuamente y que son susceptibles de conducir al técnico en la elección de cultivos racionales.

En el *Discurso* del Prof. Diego de la Rosa Acosta se hace un acertado resumen acerca de la *Importancia del suelo*, en el que destaca el papel fundamental que ejerce en el desarrollo de la vida y mantenimiento de la *biodiversidad terrestre*. Comenta también su situación singular y sus funciones de relación con la tierra, el aire, el agua y la vida. Con ello, viene a resaltar su carácter dinámico y su diversidad de funciones, como algún autor ha puesto de manifiesto al indicar que “atrajo a su estudio especialistas de muy diversos campos científicos, desde el punto particular en que sus ocupaciones profesionales les hicieron conectar con la Edafología” (Vilas López, 1948).

Ese dinamismo provoca una extraordinaria *variabilidad espacial*, por lo que “los suelos en el paisaje representan un enorme mosaico de infinitas teselas”, con lo cual, en muchas ocasiones, en estos mosaicos se encuentran suelos que, constituyendo un continuum, pueden estar formados por distintos *individuos suelos*, lo cual, taxonómicamente, hace más difícil su estudio. No obstante, indica el nuevo Académico que “para no perder la perspectiva de globalidad de un sistema tan complejo, los métodos integrados de estudio del suelo no ignoran la conocida Teoría General de Sistemas”.

Es difícil valorar la importancia total que para la vida en nuestro Planeta tiene el suelo. Por otro lado, a su complejidad estructural, de componentes y funciones, se une su fragilidad, por lo que, a nivel de la Unión Europea, destaca la Estrategia Temática de Protección de Suelos.

A este respecto, es interesante recordar que, hace años, el Prof. Dr. Dr. E. Mückenhausen, director del Abteilung Bodenkunde de la Universidad de Bonn, mostraba a sus alumnos –como parte de un Museo Vivo de Suelos–, zonas protegidas en distintos lugares de aquella Alemania Occidental de la postguerra, para el mantenimiento, en lo posible, de Individuos Suelos de Referencia; concepto muy parecido al de la campaña sobre “Suelo del Año” que, actualmente, hace la Sociedad Germana de la Ciencia del Suelo, según relata nuestro nuevo Académico.

En un apartado de *Experiencia Práctica* de su *Discurso*, el nuevo Académico considera oportuno citar algunos aspectos destacados de la problemática agrícola al margen del conocimiento edafológico. Indica que con la *experiencia práctica*, o conocimiento ordinario, se refiere al comportamiento del sistema-suelo cuando se utiliza y gestiona haciendo agricultura. Aclara, sin embargo, que “para conseguir una buena y realmente sostenible agricultura, resulta imprescindible contar con el conocimiento científico y, a

la vez, con la experiencia práctica o tecnológica”. En esta línea, recuerda los hallazgos tecnológicos más influyentes en la historia reciente de la agricultura: finales del s. XIX, *el uso del tractor* y en los años veinte, la *síntesis catalítica del amoníaco* y la fabricación industrial de *fertilizantes fosfatados y potásicos*.

Desde los años cincuenta, la *aplicación masiva de agroquímicos* se considera como una revolución de la agricultura, aunque también con un importante impacto ambiental negativo. Y en los años 1960s, técnicas relativamente nuevas, permiten una mayor *eficiencia en el uso del agua*.

Entre las décadas de los sesenta y los setenta, la *Revolución Verde*, iniciada por Norman Borlaug, y caracterizada por la mejora genética de las variedades de cereales de grano, consiguió –con el uso intensivo de ciertas prácticas agrícolas– aumentar en un 250% la producción mundial de grano.

Entre las *Memorias personales* que Diego de la Rosa introduce en esta parte de su *Discurso*, hay algunas de los años cincuenta y sesenta que son dignas de figurar entre los mejores relatos de la vida de un agricultor tradicional.

Dice que “Por aquellos años, conocí cómo en los caseríos de campo la “sala de máquinas”, donde la reina de ellas era la trilladora, comenzaba a ser más importante que las cuadras de los animales. No obstante, en esas fechas, todavía eran frecuentes las hileras de yuntas arando besanas y olivares, las cuadrillas de sembradores y segadores a mano y hoz, la trilla de habas y garbanzos con trillos tirados por mulas, las cuadrillas de “macheadores” labrando las viñas con azadón, etc. Todas estas fases de la *agricultura tradicional*... “se continuaban en la casa de labranza, con molino, lagar, bodega, granero, pajar, cuadra, etc...”. “Todo ello lo recuerdo acompañado de los olores propios de las diferentes elaboraciones, tales como la vendimia, la almazara, la matanza o la trilla”..., “ese tipo de campo tradicional ya no existe, aunque el territorio siga ahí y los suelos, igualmente, perduran”.

Solo deseo añadir a estas Memorias personales, unos versos:

Bemdito sejas tú - Senhor Jesús!

.....

Bemdito, en todo o lar,

todo o caminho

Pe la luz, pelo pão e pelo

vinho

Que nos dê, por teu

mando, o Sol e a

Terra

(“Pão Nosso, Alegre Vinho, Azeite da Candeia”; Corrêa d’Oliveira, 1920).

Sobre aquel poso bien decantado de vivencias camperas -y con las luces naturales enraizaron y crecieron las enseñanzas recibidas posteriormente de tantos otros pioneros en

Evaluación de Suelos, tales como Story, Klingebiel, Montgomery, Bramao, Cardoso, Riquier, Cornet, etc.

Estructuras, componentes, factores ambientales y determinadas intervenciones del hombre (laboreo, fertilización, irrigación, etc) son, en definitiva, características cuantitativas y/o cualitativas de la *adecuabilidad, productividad y sostenibilidad...* en diferentes Usos de Suelos y Tierras.

Tradicionalmente, las *Evaluaciones de Suelos y Tierras*, relacionadas entre sí por la menor o mayor entidad o complejidad de sus contenidos y facilidad de intervención o modificación humana, se consideran *clasificaciones prácticas* respecto a sus *capacidades* productivas (*Land capability*), para cultivos en general o para determinados usos u obras de intervención humana.

En este último caso –frente a los requerimientos de un tipo de uso concreto–, se clasifica, considera o evalúa la *adecuabilidad* de un Suelo o una Tierra respecto a dicho uso. En concreto, se le solía incluir en una Clase o Tipo de Suelo o Tierra para aquel uso. Asimismo, los primeros métodos de Evaluación se referían a la clasificación del suelo o tierra para un determinado tipo de *uso general* (secano, riego, pasto, forestal...).

Tal vez, los esbozos de definición de *Evaluación de Suelos* están mostrando el importante cambio conceptual y operativo de la *Agricultura productivista* a la *Agro-ecología*, esta última, como disciplina científica que aplica los principios y conceptos ecológicos a la agricultura, mientras que la *Agro-ecología edafológica* hace especial referencia al papel crucial que desempeña el suelo.

Es evidente que, respecto a la metodología de Evaluación, la complejidad estructural, de componentes y funciones del *sistema suelo* crece cuando se considera el sistema suelo-uso. Lógicamente, la metodología moderna de *Evaluación de Suelos* comienza por la *modelización* de dicho sistema. Se considera que, según la complejidad descriptiva, diversos *modelos empíricos* (simples, paramétricos, estadísticos, sistemas expertos, de lógica difusa, en red neuronal...) y *modelos mecanicistas*, que simulan procesos biofísicos según las leyes de la naturaleza, se usan para informar sobre los cambios del sistema en el espacio y el tiempo. Unos y otros modelos tienen cometidos de *predicción* y, al mismo tiempo, facilitan la toma de decisiones y el modo de actuación en escenarios hipotéticos de cambio global (*prescripción*).

De este modo he pretendido esbozar el perfil investigador del nuevo Académico, que en resumen se puede decir que ha llegado a conocer en profundidad la teoría y práctica de la disciplina científica *Evaluación de Suelos*, como parte esencial e integradora de la *Ciencia del Suelo*; realizando innovadoras e internacionalmente reconocidas aportaciones metodológicas, tal y como ha puesto de manifiesto en su original, interesante y sentido *Discurso*, y como se esperaba del atractivo título del mismo: “Una agricultura a la medida de cada suelo”.

Agradezco al Excmo. Sr. Presidente y a los Excmos. e Ilmos. Sres. Académicos de la RASC; a los Excmos. Sres. en representación de otras Academias e Instituciones,

y a todos los asistentes a este Acto, que tanto me honran con su presencia, la amable atención prestada a mis torpes palabras e ideas. Por último, permítanme que termine tomando prestadas unas consideraciones respecto a la *adecuabilidad de los suelos* para el cultivo de la vid, en el vecino y querido territorio portugués.

ONDE A VINHA NASCEU

Vale? alcantil? ou chão virgineo e liso?
Vinha! em que terra foste revelada? -
Diga-o quem saiba qual mulher amada,
Entre as mais, inventou o beijo e o riso!
Foi á beira do Mar, ou sôbre o viso
De olimpica Montanha consagrada?
Eva fatal de pampanos coroada,
Ó Serpe! onde é que foi teu paraíso? -
Pensam: Talvez nas auras do Levante:
Pois vinho é sol, é fogo palpitante,
Quimera, esp'rança e pompa oriental.
E eu digo: Sim! o vinho é sol... Mas vêde:
Nêle ha Saudade, ha luz que se despede...
O adeus do sol, no extremo Portugal!

He dicho.