

Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos

Victoria Ochoa, Belén Hinojosa, Beatriz Gómez-Muñoz, Roberto García-Ruiz

Programa de Doctorado/Master "Análisis y gestión de ecosistemas". Departamento de Biología Animal, Vegetal y Ecología. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n, 23071, Jaén.

vochoa@ujaen.es

Resumen

El suelo es un sistema vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es clave para la producción de alimentos y para el mantenimiento de la calidad ambiental a escalas local, regional y global. No sólo es la base para la agricultura y para los diferentes ecosistemas, sino que además de él depende toda la vida del planeta. De estas ideas nace el concepto de calidad del suelo, que se basa en las propiedades inherentes y dinámicas de los procesos edafológicos. Debido a la gran heterogeneidad de estas propiedades, no existe una sola medida biológica o físico-química para determinar el estado de salud o calidad de un suelo, así, en la actualidad se utilizan múltiples indicadores de calidad relacionados con las propiedades químicas o biológicas que responden rápidamente a cambios en el manejo o perturbaciones del sistema. De entre ellas, destacan las actividades enzimáticas, que, actualmente, están siendo ampliamente estudiadas. La agricultura es, tal vez, en la actualidad, la actividad antropogénica que más perjudica de forma directa e indirecta, tanto en extensión como en temporalidad, al suelo, y, sin embargo, es la actividad con menores restricciones normativas. En este trabajo exponemos una breve revisión de algunos estudios que han abordado la medida de la calidad del suelo a través de distintos indicadores microbiológicos basados en actividades enzimáticas y el efecto de algunas prácticas de manejo sobre éstas.

El suelo. Concepto de "Calidad del suelo".

El suelo cumple un papel fundamental en el equilibrio global de la tierra, ya que representa la interfase entre la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. Hace posible el crecimiento de las plantas al suministrarles anclaje, agua y nutrientes, y por ello la vida en el planeta en su forma actual. La vida y los medios de vida sobre la tierra, a nivel general, dependen de la capacidad del suelo para producir, de ahí la necesidad de mantener un equilibrio entre su explotación como recurso y el incremento de la población humana (consumidora de alimentos).

La comunidad científica ha reconocido hace tiempo que la calidad de dos grandes recursos naturales como son el aire y el agua está siendo degradada por la actividad humana. El establecimiento en las normativas de índices que miden la calidad de éstos y de umbrales, no cabe duda, que han contribuido a minimizar el impacto de las actividades humanas sobre estos recursos. Sin embargo, la aceptación de la degradación del suelo por diferentes usos y prácticas de manejo es reciente, posiblemente por la elevada capacidad de amortiguación del suelo. Así, en la última década, ha sido cuando se ha empezado acuñar el concepto de calidad del suelo, siempre en relación a su productividad y fertilidad. Sin embargo, para mantener y gestionar la sostenibilidad del suelo, es preciso que la medida de

su calidad se fundamente en criterios que engloben todas sus múltiples facetas. Esta misma idea fue expuesta por el presidente de la Soil Science Society of America Ad Hoc Committee on Soil Health, Darrell W. Nelson (1992), que propuso que en la definición de calidad del suelo se tengan en cuenta: (i) su capacidad de ser un elemento fundamental de los ecosistemas, (ii) ser medio para el desarrollo de plantas y animales, (iii) mantener y aumentar la calidad de aire y agua. Diferentes autores han definido de forma más precisa la calidad del suelo (Papendick y Parr, 1992, *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 2-3; Karlen *et al.* 1997, *Soil Science Society of America J.* 61:4-10). Probablemente, la más aceptada sea la de Doran y Parkin (1994) que la definieron como "la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites ecológicos, para sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental, y promoviendo la salud de la flora y la fauna". (Doran. J.W. y Parkin, B.T. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Enviroment.* Soil Science Society of America. Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA).

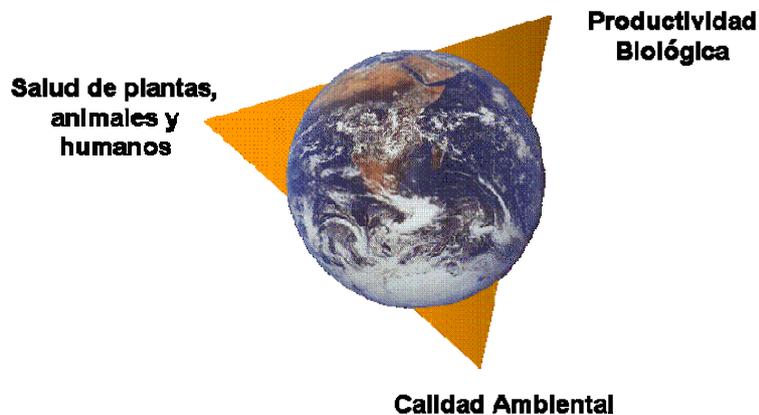


Figura 1. Principales componentes de la Calidad del Suelo (Doran y Parkin, 1994.).

Indicadores de calidad del suelo

La búsqueda de indicadores de calidad del suelo ha sido una de las principales prioridades en el ámbito de la Ecología del Suelo, durante las dos últimas décadas. Recientemente y consciente del acusado deterioro del suelo, se ha incrementado el interés por encontrar una medida para evaluar la calidad del suelo. La dificultad de esta tarea radica en que el suelo es una entidad dinámica con multitud de procesos biológicos y geoquímicos que muestran una elevada heterogeneidad espacial y temporal, y con mecanismos de control que cambian según la escala espacio-temporal. Los indicadores candidatos a cuantificar la calidad del suelo deben ser: i) fácilmente medibles, ii) sensibles al estrés, iii) responder de forma predecible, iv) ser anticipatorios, es decir, adelantarse al cambio más o menos reversible, y v) tener una baja variabilidad "natural" en su respuesta. (Landres *et al.*, 1988, *Conservation Biology* 2:316:328; Kelly y Harwell, 1990, *Environmental Management* 14: 527:545; Cairns, 1993, *Journal of Clean Technology and Environmental Science* 1:1-11; Dale y Beyler, 2001, *Ecologicas* 1: 3-10). La selección de indicadores adecuados y que cumplan estas condiciones es clave para el éxito de cualquier programa de monitorización, y, por tanto, para evaluar el grado de éxito de prácticas de manejo respetuosas con el medio ambiente en general, y con el suelo en particular.

Indicadores basados en las propiedades físico-químicas del suelo son los que, hasta el momento, se ha utilizado para medir la productividad del suelo.

Tabla 1. Indicadores microbiológicos de calidad del suelo

PROPIEDAD BIOLÓGICA DEL SUELO	INDICADOR MICROBIOLÓGICO	MÉTODOS DE MEDIDA	REFERENCIAS
BIODIVERSIDAD	Diversidad Genética	PCR-DGCE	Muyzer y Smalla, 1998., <i>Int. J. Gen. Mol. Microbiol.</i> 73:127:141
	Diversidad Funcional	BIOLOG MICROresp	Garland, 1997., <i>FEMS Microbiol. Ecol.</i> 24:289-300
	Marcadores de lípidos	PLFA	Hinojosa et al. 2005., <i>J. Environ. Qual.</i> 34: 1789-1800.
CICLO DEL CARBONO	Respiración del suelo	Producción de CO ₂ / Consumo de O ₂	Stenstrom et al. 1998., <i>Ambio.</i> 27: 35-39.
	Cociente metabólico (qCO ₂)	C _{res} /C _{biomasa}	Trasar-Cepeda C. et al. 2008., <i>Soil Biol. Biochem.</i> 40: 2146:2155.
	Descomposición de materia orgánica	Bolsas de descomposición	Gallardo A. and J.Merino, 1993., <i>Ecology</i> 74:152-161
	Actividades enzimáticas	Deshidrogenasa fosfatasas, hidrolasas...	García-Ruiz et al. 2008., <i>Soil Biol. Biochem.</i> 40: 2137-2145
	Organismos metanotróficos	MPN PLFA	Bourne et al. 2000., <i>FEMS Microbiology Ecology</i> 31:29-38
CICLO DEL NITRÓGENO	Mineralización del N	Acumulación de NH ₄ ⁺	Kandeler et al. 1999., <i>Biol. Fert. Soils</i> 28: 343-351.
	Nitrificación	Oxidación de NH ₄ ⁺	Visser et al. 1992., <i>Am. J. Alt. Agric.</i> 7: 33-37.
	Desnitrificación	Ensayo de inhibición con acetileno	García-Ruiz et al. 1998., <i>Sci. Total. Envi.</i> 210/211: 321-327.
	Fijación de N por Rhizobium	Test de Pot	Brookes, 1995., <i>Biol. Fert. Soils.</i> 19: 269-279.
	Fijación de N por Cyanobacteria	Nitrogenasa / MPN	Brookes, 1995., <i>Biol. Fert. Soils.</i> 19: 269-279.
BIOMASA MICROBIANA	Biomasa microbiana por métodos directos	PLFA	Bloem et al.2002., <i>Microbial Indicators.</i> En: <i>Bioindicators/Biomonitors.</i> Principles, Assessment, Concepts. Breure, A.M., Markert, B.A., y Zechmeister, H.G. (eds). Marcel Dekker Inc., New York, pp. 245-278.
	Biomasa microbiana. (M.Indirectos)	CFI, CFE, SIR	Carter et al. 1999., <i>Can. J. Soil. Sci</i> 79: 507-520.
	Cociente microbiano	C _{micro} /C _{org}	Sparling 1997., Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. En: <i>Biological Indicators of Soil Health.</i> Pankhurst, C.E., Doube, B.M., y Gupta, V.V.S.R. (eds). CAB International, pp. 97-119
	Fungi	PLFA	Gaspar et al. 2001., <i>Current microb.</i> 42: 339-344
	Ratio: Fungi-bacterias	PLFA	Bardgett et al, 1999., <i>Biol. Fert. Soils.</i> 29:282-290.
	Protozoos	MPN	Fredslund et al. 2001., <i>App. Envi. Microbiol.</i> 67:1613-1618.

PLFA: Análisis de fosfolípidos de membrana/ MPN: Número más probable/ CFI: Incubación y fumigación con cloroformo/ CFE: Extracción y fumigación con cloroformo/ SIR: Respiración inducida con un sustrato/PCR-DGGE: Electroforesis con gel en gradiente desnaturizante.

La materia orgánica es una variable de "calidad" establecida en suelos agrícolas, pero ésta cambia lentamente y se precisan de muchos años para que se produzcan cambios medibles en la materia orgánica de un suelo debidos a cambios en el manejo de éste

En la actualidad, son las propiedades bioquímicas y biológicas las candidatas a ofrecer una mejor herramienta para medir calidad del suelo.

Actualmente se han acumulado las evidencias de que las propiedades biológicas de un suelo son indicadores tempranos de estrés, haciéndolas idóneas para su uso en los diferentes programas de monitorización (Dick, 1999, Enzyme activities as integrative indicators of soil health. En: Parkhurst CE (ed), *Bioindicators of Soil Health*, Oxon, UK, CAB Internacional, pp: 121-156; Dick y Tabatabai, 1992, Significance and potential use of soil enzymes. En: F.B. Metting (ed), *Soil Microbial Ecology*, Marcel Decker, NY. pp.95-130).

Los indicadores microbiológicos del suelo son aquellos relacionados directa o indirectamente con la estructura y función de los microorganismos (Nielsen y Winding, 2002, *NERI Technical report*, nº 388, 82pp). Éstos dan una medida integrada de la calidad del suelo, aspecto que no puede ser obtenido a través del análisis tradicional de variables físico-químicas tales como pH, capacidad de intercambio catiónico, etc. En la tabla 1 se muestran los indicadores microbiológicos que más se han utilizado para determinar la calidad del suelo, así como los métodos más usuales de medida.

Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo

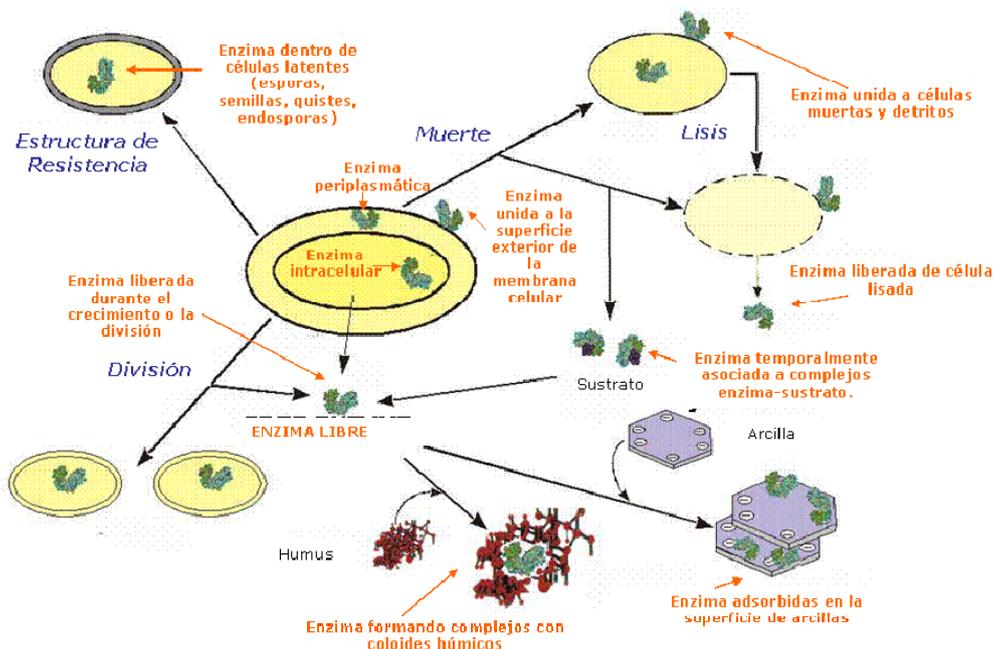


Figura 2. Fuentes y estados de las enzimas en el suelo

Las enzimas son proteínas cuyo papel fundamental es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos; actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos. Los microorganismos del suelo y la rizosfera liberan enzimas al suelo a través de

secreción y lisis celular. Un bajo porcentaje de estas proteínas quedan inmovilizadas y estabilizadas con diferentes componentes de la fase sólida del suelo, como las arcillas, moléculas orgánicas y complejos organominerales (Joinville *et al*, 2004, *J Colloid Interface Sci* 273:414-425).

Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima en el suelo es dependiente del pH, fuerza iónica, temperatura y presencia o ausencia de inhibidores (Burns R.G, 1982. *Soil Biol Biochem* 14:423:427). Burns, en 1978, realizó la primera revisión sobre las enzimas del suelo en el que se recoge su origen, rango, cinética e historia, e incluyó aspectos aún hoy en día tan actuales como la interacción de las enzimas y diversos agroquímicos, su significado, y algunos aspectos metodológicos (Burns, R.G. 1978. Enzyme activity in soil: Some theoretical and practical considerations, In R.G. Burns (ed.). *Soil Enzyme*. Academic. Nueva Cork, pp. 295-340). La figura 2 muestra las posibles fuentes y estados de las enzimas en el suelo.

Las enzimas son relativamente resistentes a los procesos de desnaturalización (Ladd, J.N., 1978. Origin and Range of Enzyme in Soil. En: Burns, R.G. (Ed.), *Soil enzymes*. Academic Press, London, pp.51-96), por lo que es difícil extraerlas del suelo y, por tanto se estudian indirectamente midiendo su actividad, y expresándolas en cantidad de producto final por tiempo de incubación y gramo de suelo.

El papel fundamental que juegan las actividades enzimáticas (AE) en el suelo radica en que el funcionamiento de los ecosistemas no se puede entender correctamente sin la participación de los procesos enzimáticos (Overbeck, J., 1991. Early studies on ecto- and extracellular enzymes in aquatic environments. En: Chróst, R.J (Ed.), *Microbial enzymes in aquatic environments*. Springer, NY, pp.1-5), ya que están directamente implicadas en la transformación de las formas complejas de carbono de la materia orgánica a nutrientes fácilmente disponibles para las plantas, determinando así la pauta de gran parte de las transformaciones químicas que se producen en el suelo (Stryer L., 1995. *Biochemistry*. 4ª Edición. Freeman and Company, NY).

Visser y Parkinson (1992) han sugerido que las propiedades biológicas y bioquímicas más útiles para determinar la calidad del suelo desde una perspectiva funcional, son aquellas relacionadas más íntimamente con el reciclado de nutrientes, porque proporcionan "información" sobre el estado funcional del suelo. De entre los indicadores microbiológicos, cabe destacar las AE relacionadas con el reciclaje del N, P, C y S, ya que, por un lado, nos proporcionan información sobre el estado microbiológico del suelo, y por el otro, sobre sus propiedades físico-químicas (M.A. Aon y A.C. Colaneri, 2001, *App. Soil Ecol.* 18: 255-270), siendo indicadores tempranos de cambios en la calidad del suelo. Además, responden rápidamente a perturbaciones gracias a su rápida adaptación a las condiciones ambientales, y, por último, son relativamente fáciles y baratas de medir, lo que facilita su protocolización.

Según su función, las enzimas del suelo más estudiadas son las oxidorreductasas (en particular, deshidrogenasas, catalasas y peroxidasas), y las hidrolasas (fosfatasa, proteasa y ureasa). En la figura 3 se muestran algunas de las AE más estudiadas, directamente implicadas en el ciclo del N, el P, el C o el S. (Caldwell, B.A. 2004., *Pedobiología*, 49: 637-644; *Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana*. García C., Gil-Sostres, F., Hernández, T., Trasar-Cepeda, C. (eds). Madrid, Barcelona, México. 2003. pp. 371).

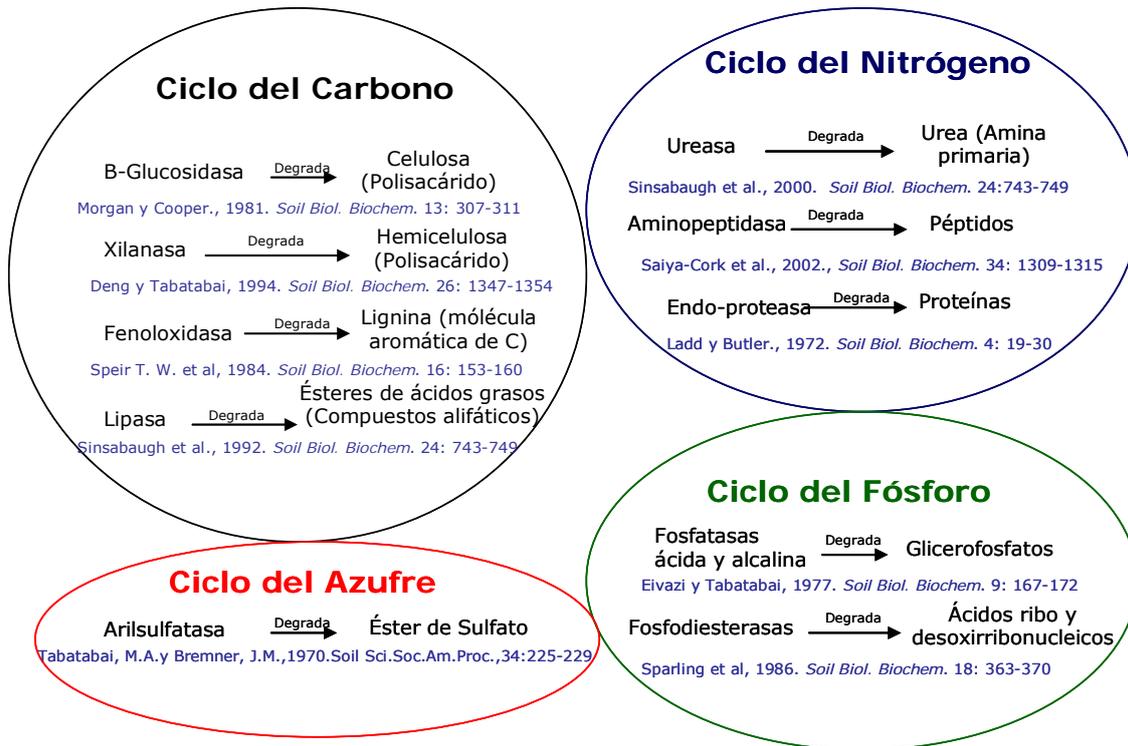


Figura 3. Ejemplos de Actividades enzimáticas relacionadas con los ciclos del C, N y P.

Implicación de los agroecosistemas en la calidad del suelo

La población humana se ha duplicado en los últimos 50 años. Actualmente nos encontramos cerca de 6.5 mil millones de habitantes y diferentes estimas acercan esa cifra a los 10-12.000 millones de habitantes en el año 2100. Con estas cifras es fácil pensar que la superficie del planeta dedicada a la agricultura será cada vez mayor, siendo necesaria una mayor eficiencia en la productividad. Estas formas de producción agrícola más eficientes, particularmente en los países industrializados del hemisferio norte, han originado problemas serios a las comunidades urbanas y rurales. Su dependencia de la utilización extensa de productos agroquímicos, y la ampliación de la producción a medios frágiles, previamente no cultivados por su escasa rentabilidad económica, han dado lugar al deterioro de ambientes rurales, agotamiento de los recursos hídricos, erosión del suelo y empobrecimiento de la diversidad biológica, ya que los agroecosistemas se diferencian de los ecosistemas naturales por una fuerte simplificación estructural, la contaminación de alimentos con residuos de pesticidas, la despoblación de las comunidades rurales, y en definitiva, a la disminución de la calidad del suelo (Siardos, 1993., *Sustainable agriculture and agricultural development*. MEDIT, N° 4:13-16, C.I.H.E.A.M., Bari, Italy). Nunca la desertificación de los suelos agrícolas y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas han sido tan elevadas como lo son ahora. De hecho, según informes recientes de la FAO, la sobreexplotación y erosión de los recursos edáficos han originado ya la desertificación de gran parte de la Cuenca Mediterránea. Sorprendentemente, la agricultura sigue siendo aún una de las actividades productivas sometida a menor grado de restricciones ambientales, al compararla con otras actividades como la industria o el transporte, (Vitousek et al., 1997., *Science* 277: 494-499).

El presente y futuro de la agricultura viene unido a aumentar la calidad de

los productos, reducir los costes unitarios, hacer más eficaces los procesos productivos, acabar con la superada doctrina del incremento de los rendimientos, y de manera muy especial, la conservación del medio ambiente. Es por ello que la sostenibilidad de los agroecosistemas es un concepto de la más inmediata actualidad, como así lo atestiguan el 5º Programa de Acción Medioambiental de la Comisión Europea (Comisión of the European Communities, 1998. Directions towards sustainable agriculture, COM, 22 final, Brussels 17.01), la existencia de unas directrices europeas hacia una agricultura sostenible (Comisión of the European Communities, 1999. Directions towards sustainable agriculture, 22 final, IP/99/48), o que sea referencia en la Unión Europea para establecer nuevas estrategias de subvención a la agricultura de los países miembros. La Asociación Americana para la Conservación del Agua y del Suelo Agrícola de EEUU, definió la Agricultura Sostenible como: "El sistema de cultivo capaz de mantener la productividad y la utilidad de la agricultura para el hombre, de forma indefinida, basado en la conservación de los recursos, la competitividad comercial, el respeto al medio ambiente y que está firmemente apoyado por la sociedad".

Agricultura Ecológica

En la línea de estrategias agrícolas que persiguen una relación respetuosa con el medio que la sustenta, destacan la agricultura integrada, eco-compatible, alternativa o sustitutoria, y, por último, la agricultura ecológica, también llamada biológica u orgánica. Según el Reglamento del Consejo Regulador de la Agricultura Ecológica (ORDEN del M.A.P.A. del 4 de octubre de 1989), basado en el Reglamento (CEE) 2092/91, la agricultura ecológica "...es un sistema agrario cuyo objeto fundamental es la obtención de alimentos de máxima calidad, respetando el medio ambiente y conservando la fertilidad de la tierra, mediante la utilización óptima de los recursos y sin el empleo de productos químicos de síntesis". Según las directrices del Codex alimentarius (CAC/GL 32.1997 punto 7), la agricultura ecológica debe tener, entre otros, los siguientes objetivos:

- Aumentar la diversidad biológica del sistema en su conjunto
- Incrementar la actividad biológica del suelo
- Mantener la fertilidad del suelo a largo plazo
- Reutilizar los desechos de origen vegetal y animal a fin de devolver nutrientes a la tierra, reduciendo al mínimo el empleo de recursos no renovables.
- Basarse en recursos renovables y en sistemas agrícolas organizados localmente.
- Promover un uso saludable del suelo, el agua y el aire, y reducir al mínimo todas las formas de contaminación de estos elementos que pueden resultar de las prácticas agrícolas.

Actualmente, la superficie mundial de suelo con uso en agricultura ecológica ocupa más de 31×10^6 ha. De éstas, el 39% se encuentra en Australia, el 21% en Europa, el 20% en América del Sur, el 13% en Asia, el 4% en América del Norte y el 3% en África. En la Unión Europea, la superficie cultivada de manera ecológica o en fase de conversión hacia la agricultura ecológica ha aumentado, pasando de

unas 900.000 ha en 1993 a más de seis millones en la actualidad.

España reúne condiciones para el desarrollo de este tipo de agricultura por su favorable climatología y los sistemas extensivos de producción que se aplican en un gran número de cultivos, como es el caso del olivar en la provincia de Jaén. La superficie ha aumentado desde 4.235 ha, en 1991, a las 988.323 ha en 2007. Andalucía es la comunidad autónoma con la mayor superficie inscrita de agricultura ecológica, siendo el olivar uno de los cultivos que mayor extensión ocupa. La provincia de Jaén cuenta con 53.398,08 ha de cultivo ecológico, de las cuales el olivar está presente en 3.048,46 ha.

El control y la certificación de la producción agraria ecológica en España se lleva a cabo mayoritariamente a través de Consejos o Comités de Agricultura Ecológica territoriales, que son organismos dependientes de las Consejerías o Departamentos de Agricultura de las Comunidades Autónomas, o directamente por Direcciones Generales adscritas a las mismas, no obstante, en Andalucía han autorizado a su vez organismos privados para la realización de estas funciones.

Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en Agricultura Ecológica

Una de las principales diferencias entre las prácticas de manejo del suelo en sistemas de cultivo convencional y ecológico radica, junto con el laboreo, en la fertilización. Mientras que la reposición de nutrientes en la agricultura convencional se realiza con la aplicación directa de nutrientes ya disponibles, en la ecológica es a través de sustratos orgánicos de origen animal o vegetal. La liberación de nutrientes disponibles desde los sustratos orgánicos es mediada a través de un abanico de AE presentes libres y/o adsorbidas a las partículas de arcilla (Tabatabai, 1994., *Soil Enzymes*. En: Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2, Microbiological and Biochemical Properties*,. Book Series nº 5. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, pp. 903-968), que se activan en presencia de sustrato (materia orgánica). Por otra parte, las AE se inhiben directamente, y los microorganismos reducen la tasa de producción de enzimas, en presencia de exceso de producto (nutrientes en forma oxidada), en este caso, fertilizantes inorgánicos, utilizados ampliamente en sistemas agrícolas convencionales (González-Prieto y Carballas 1995., *Soil Biolog. Biochem.* 27: 205-210).

En la actualidad, existe una gran controversia en cuanto a la utilidad de las AE como indicadores de calidad del suelo; no siempre valores mayores de actividad están asociados a manejos más respetuosos con el medio ambiente. Por ejemplo, diferentes autores han encontrado resultados contradictorios en relación al **efecto del laboreo**; Kahn encontró valores elevados de AE en unidades experimentales con elevada intensidad de laboreo, probablemente debido a la desagregación de las arcillas (Khan A.R., 1996., *J. Agron. Crop Sci.* 177:253-259). Sin embargo, Mijangos *et al.* encontraron, en general, mayor actividad para la deshidrogenasa, la β -glucosidasa y la arilsulfatasa en aquellas parcelas que sin laboreo o mínimo laboreo frente al laboreo convencional, aunque no en todos los casos las diferencias fueron significativas (Mijangos I. *et al.*, 2006. *Enzyme microl. Technol.* 40:100-106). Otros autores han encontrado un claro descenso en las AE que explican con la pérdida de la materia orgánica que se mezcla con los horizontes inferiores del suelo (Carter, M.R., 1986., *Soil Hill. Res.* 7:29:40). En cuanto al uso de **fertilizantes orgánicos**, algunos autores han encontrado un incremento en las AE por el aporte extra de materia orgánica y por tanto de los

microorganismos presentes en el suelo (Kandeler *et al.* 1999), mientras que otros han encontrado un detrimento explicado por la calidad del estiércol utilizado. (Schipper, L.A y Sparling, G.P., 2000., *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64:300-311). Con respecto al uso de **fertilizantes inorgánicos**, a pesar de que hay indicios de que la presencia de nutrientes en formas inorgánicas disponibles inhibe la síntesis de enzimas en el suelo (Olander, L.P. y Vitousek, P.M. 2000., *Biogeochem.* 49: 175-190), la presencia de éstos puede incrementar la actividad y crecimiento de las plantas y estimular la secreción de enzimas y sustratos en la rizosfera (Lynch, J.M y Panting, L.M., 1980. *Soil Biol. Biochem.* 12:29-33). El efecto del mantenimiento y/o desbroce de la **cubierta vegetal** sobre la calidad del suelo (medida a través de las AE), también presenta resultados contradictorios. Algunos estudios muestran un incremento en las AE asociado al aumento de la biomasa radicular en descomposición tras la siega (Holland, J.N., 1995. *Appli. Soil Ecol.* 2:275-279), mientras que otros presentan un descenso de las AE como resultado de la menor producción de exudados por la rizosfera (Northup, B.K. *et al.* 1999., *Appli. Soil Ecol.* 13:259:270). Aún así, algunos trabajos manifiestan que no existe relación entre el manejo de la cubierta vegetal con desbroce y las AE (Kuryakov, Y. *et al.*, 2002., *Biol. Fert. Soils.* 35: 348-358). Mijangos *et al.* también encontraron resultados significativos relacionados con el uso de herbicidas para el manejo de la cubierta, de tal forma que los suelos que han sido sometidos a estos tratamientos muestran un valor más bajo de la actividad deshidrogenasa que en aquellos no tratados (Benitez E. *et al.*, 2006. *Applied Soil Ecol.* 32: 221-231). Estos resultados se deben probablemente a que los herbicidas inhiben la actividad biológica del suelo. (Reinecke M.J. *et al.* 2002. *Pedobiology*, 46:475-484).

La introducción de **ganado** en la agricultura ecológica puede ofrecer un incremento de las AE por el suministro extra de materia orgánica en el suelo debido al aporte de estiércol animal (Zacheis, A. *et al.*, 2002. *Oecologia.* 130: 600-608). Sin embargo también puede provocar un detrimento de la AE asociado a la perturbación de la estructura del suelo (Cao G. *et al.*, 2004. *Soil Biol. Biochem.* 36:237-243).

Las propiedades microbiológicas de un suelo, y, en concreto, las AE, están reguladas por la tipología del mismo y las condiciones microclimáticas de su entorno. Por tanto, los resultados obtenidos en diferentes localidades o estudios no son comparables entre sí. Así, García-Ruiz, R. *et al.*, encontraron diferencias significativas entre los valores de la **media geométrica** (media que engloba el conjunto de los valores de las AE) de las AE ensayadas (arilsulfatasa, β -glucosidasa, fosfatasa, deshidrogenasa, potencial de nitrificación), en 18 parcelas olivar ecológico y 18 parcelas de olivar convencional comparables (similares propiedades edafoclimatológicas), y estas diferencias tendieron a ser mayores al incrementar el tiempo de certificación ecológico, y menores a medida que aumentaba la intensidad del arado en las parcelas ecológicas. (García-Ruiz, R. *et al.* 2008., *Soil Biol. Biochem.* 40: 2137-2145).

Además de la media geométrica de las AE como un índice cuantitativo de calidad del suelo, se han propuesto otros índices que recogen la información del conjunto de las AE.

Numero de Actividad Enzimática (Beck, 1984):

$$EAN = 0.2 \times (0.15 \times DH + CA + 1.25 \times 10^{-5} \times P + 4 \times 10^{-2} \times PR + 6 \times 10^{-4} \times AM)$$

(Beck, T.H., 1984. Methods and application of soil microbiological analysis at the Landensanstalt fur Bodenkultur und Pflanzenbau (LBB) for determination of some aspects of soil fertility. Proceeding of the Fift Symposium on Soil Biology. Rumanian National Society of Soil Science Bucharest, pp. 13-20)

Índice Biológico de Fertilidad (Stefanic, 1984):

$$BIF = \frac{(1.5 \times DH \times k \times 100 \times CA)}{2}$$

(Stefanic, 1984. Researches concerning a biological index of soil fertility. En: Nemes, M.P., Kiss, S., Papacotea, P., Stefanic, C., Rusan, M. (Eds). Fift Symposium on Soil Biology. Rumanian National Society of Soil Science Bucharest, pp. 33-45)

donde:

DH: Actividad deshidrogenasa

CA: Actividad Catalasa

P: Actividad Fosfatasa

PR: Actividad Proteasa

AM: Actividad Amilasa

k: Coeficiente proporcional (0.01)