

# Fertilidad del suelo y biodiversidad en agricultura ecológica

Paul Mäder,<sup>1</sup> \* Andreas Fließbach,<sup>1</sup> David Dubois,<sup>2</sup> Lucie Gunst,<sup>2</sup>

Padruot Fried,<sup>2</sup> Urs Niggli<sup>1</sup>

La comprensión de los agroecosistemas es clave para determinar los sistemas eficaces en agricultura. He aquí los resultados de un estudio realizado durante 21 años en Europa central sobre el rendimiento agronómico y ecológico de los sistemas de agricultura biodinámica, bioorgánica y convencional. Encontramos que el rendimiento de las cosechas es un 20% menor en los sistemas orgánicos, mientras que el consumo de fertilizantes y de energía se redujo en un 34 a un 53% y el de plaguicidas en un 97%. El aumento de la fertilidad del suelo y la mayor biodiversidad encontrada en las parcelas orgánicas hacen que estos sistemas sean menos dependientes de consumos externos.

La agricultura intensiva ha aumentado el rendimiento de las cosechas pero también ha planteado graves problemas medioambientales (1). La agricultura sostenible podría perfectamente generar un buen rendimiento de las cosechas con un impacto mínimo sobre los factores ecológicos como es la fertilidad del suelo (2, 3). Un suelo fértil proporciona los nutrientes esenciales para el crecimiento de la planta de cultivo, soporta una comunidad biótica activa y diversa, muestra una estructura típica del suelo y permite una buena descomposición.

Los sistemas de agricultura ecológica son una alternativa a la agricultura convencional. En algunos países europeos hasta el 8% de la superficie agrícola se gestiona de forma orgánica según el reglamento de la Unión Europea (CEE) 2092/91 (4). Pero, realmente, ¿en qué medida es sostenible este método de producción? El limitado número de ensayos a largo plazo muestra algunos beneficios para el medio ambiente (5, 6). En este informe presentamos los resultados del ensayo del sistema de comparación “DOK” llevado a cabo durante 21 años (biodinámico, orgánico y convencional) basado en una rotación con pradera temporal de gramíneas y tréboles. El experimento de campo se estableció en 1978 en un suelo de loess en Therwil, Suiza ((7) con apoyo de material en la red). Dos sistemas de agricultura ecológica (biodinámico, BIODYN; bioorgánico, BIOORG) y dos sistemas convencionales (utilizando fertilizante mineral con estiércol: CONFYM; utilizando fertilizante mineral exclusivamente: CONMIN) fueron comparados en un experimento con parcelas de campo con replicación (tabla S1 y fig. S1). Los dos sistemas convencionales fueron modificados a la agricultura integrada en 1985. La rotación de cultivos, las variedades y las labores de cultivo eran idénticas en todos los sistemas (tabla S2).

---

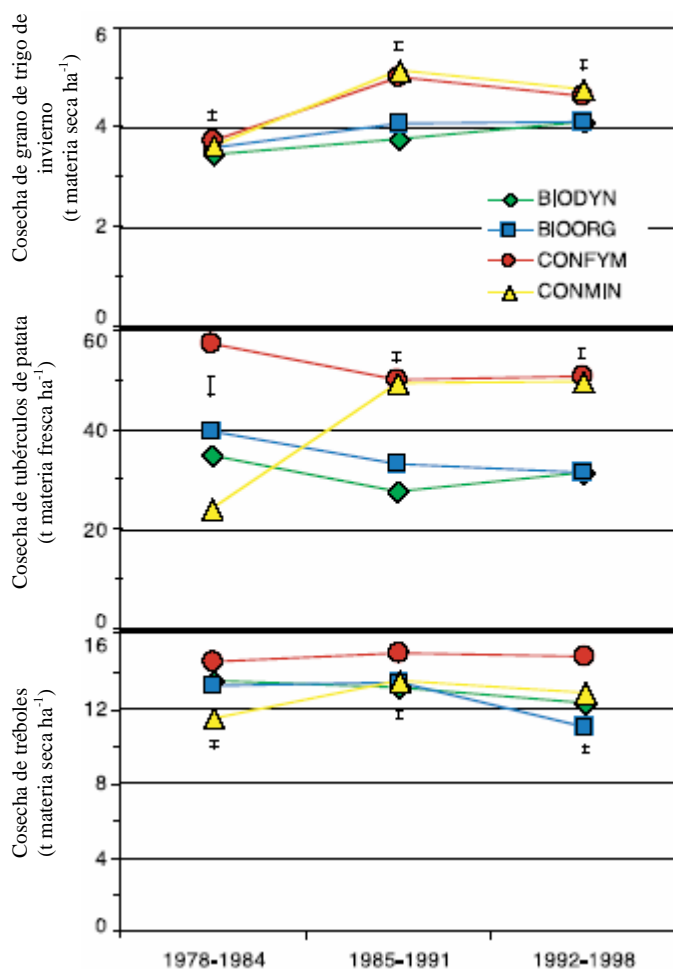
<sup>1</sup> Instituto para la Investigación de la Agricultura Orgánica, FIBL, Ackerstrasse, CH-5070 Frick, Suiza.

<sup>2</sup> Estación de investigación federal suiza para la agroecología y la agricultura, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich, Suiza.

\* A quien debería dirigirse la correspondencia. Correo electrónico: paul.maeder@fibl.ch

Encontramos que el consumo de nutrientes (N, P, K) en los sistemas orgánicos fue entre un 34 y un 51% menor que en los sistemas convencionales, mientras que el rendimiento de las cosechas mencionadas fue sólo un 20% menor a lo largo del periodo de 21 años (Fig. 1, Tabla 1), lo que indica una producción eficiente. En los sistemas orgánicos, la energía para producir una unidad de materia seca de cultivo fue entre un 20 y un 56% menor que en el convencional y en correspondencia entre un 36 y un 53% menor por unidad de superficie de cultivo (tablas S4 y S5).

La producción de patatas en los sistemas orgánicos era de un 58 a un 66% de la de las parcelas convencionales (Fig. 1), principalmente debido a la baja aportación de potasio y a la incidencia de *Phytophthora infestans*. Las cosechas de trigo de invierno en el tercer periodo de rotación de cultivos alcanzaron un promedio de 4,1 toneladas métricas por hectárea en los sistemas orgánicos. Esto supone el 90% de la cosecha de grano de los sistemas convencionales, que es similar a las producciones de las granjas convencionales de la región (8). Las diferencias en la producción de pastos de gramíneas y tréboles fueron pequeñas.



**Fig. 1.** Cosecha de trigo de invierno, patatas y pastos temporales de gramíneas y tréboles en los sistemas de agricultura del ensayo DOK. Los valores son medias por periodo de rotación de cultivos, de seis años para el trigo de invierno y el pasto y de tres años para las patatas. Las barras indican las menores diferencias significativas ( $P < 0,05$ ).

**Tabla 1.** Consumo de nutrientes, plaguicidas y energía fósil en los sistemas de ensayo DOK. El consumo de nutrientes es el promedio entre 1978-1998 para BIODYN, BIOORG y CONFYM y 1985-1991 para CONMIN. El nitrógeno soluble es la suma de  $\text{NH}_4\text{-N}$  y  $\text{NO}_3\text{-N}$ . El consumo de ingredientes activos de plaguicidas se calculó para 1985-1991. La energía para la producción de maquinaria e infraestructuras, en combustible, y para la producción de fertilizantes y plaguicidas minerales se ha calculado para 1985-1991.

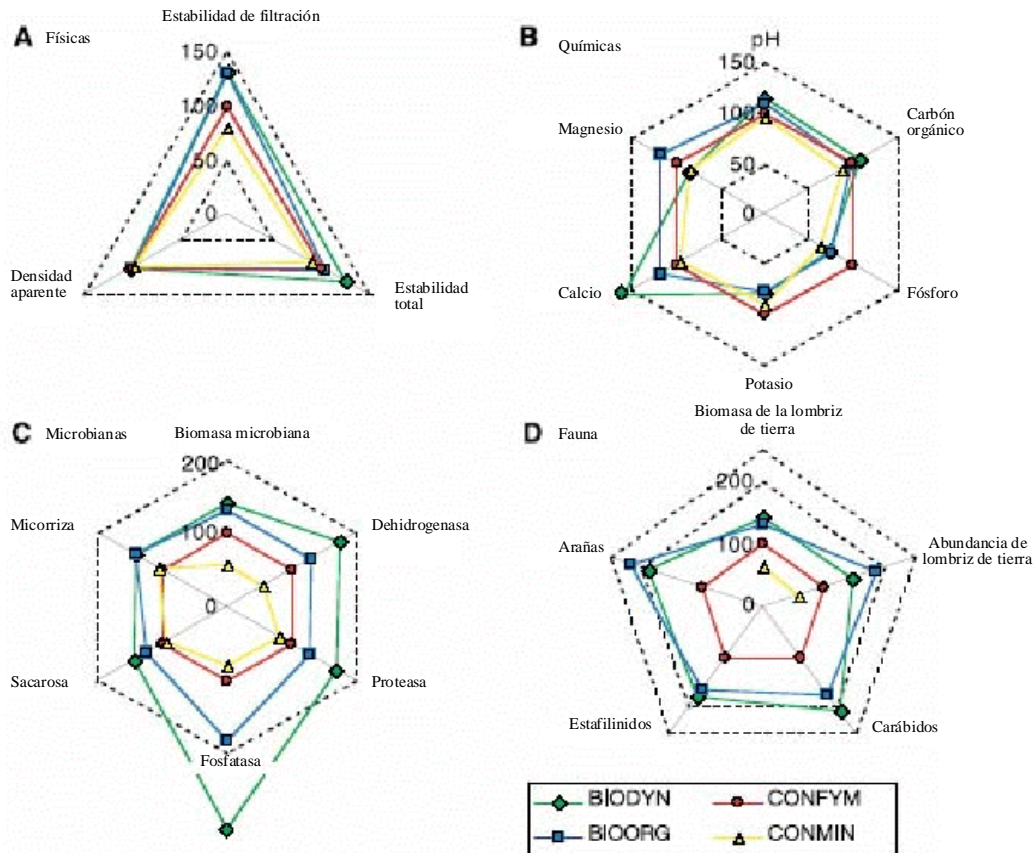
Sistema de agricultura	Nitrógeno total (kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Nitrógeno soluble (kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Fósforo (kg P ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Potasio (kg K ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Plaguicidas (kg de ingredientes activos ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Energía (Gj ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
BIODYN	99	34	24	158	0	12,8
BIOORG	93	31	28	131	0,21	13,3
CONFYM	149	96	43	268	6	20,9
CONMIN	125	125	42	253	6	24,1

El rendimiento de las cosechas de cereal bajo gestión orgánica en Europa está normalmente entre el 60 y el 70% de aquéllas bajo gestión convencional, mientras que la producción de pastos está en un rango entre el 70 y el 100%. Los beneficios de las granjas ecológicas en Europa son parecidos a los de las granjas convencionales comparables (9). Una apropiada selección vegetal puede mejorar mucho en el futuro las producciones de cereales en la agricultura ecológica. Se produjeron diferencias mínimas entre los sistemas de agricultura en lo que respecta a la calidad de los alimentos (10).

El mantenimiento de la fertilidad del suelo es importante para el uso sostenible del territorio. En nuestras parcelas experimentales, los suelos tratados orgánicamente mostraron una actividad biológica mayor que los suelos tratados de manera convencional. Por el contrario, los parámetros químicos y físicos del suelo mostraron muy pocas diferencias (Fig. 2).

La estabilidad de los agregados del suelo evaluado por el método de filtración (11) y el de cribado húmedo (12) fue entre un 10 y un 60% superior en las parcelas orgánicas que en las parcelas convencionales (Fig. 2A). Estas diferencias reflejan la situación tal y como se observó en el terreno (Fig. 3, A y B), donde las parcelas orgánicas tuvieron una mayor estabilidad del suelo. Observamos una correlación positiva entre la estabilidad de los agregados y la biomasa microbiana ( $r = 0,68$ ,  $P < 0,05$ ) y entre la estabilidad de los agregados y la biomasa de las lombrices de tierra ( $r = 0,45$ ,  $P < 0,05$ ).

El pH del suelo fue ligeramente más alto en los sistemas orgánicos (Fig. 2B). Las fracciones solubles del fósforo y del potasio fueron menores en los suelos orgánicos que en los suelos convencionales, mientras que las del calcio y el magnesio fueron mayores. No obstante, el flujo de fósforo entre la matriz y la solución del suelo fue mucho mayor en el sistema BIODYN (13). Los microorganismos del suelo manejan las numerosas reacciones de los ciclos de los nutrientes en el suelo. La biomasa microbiana del suelo aumentó en el orden CONMIN < CONFYM < BIOORG < BIODYN (Fig. 2C). En los suelos de los sistemas orgánicos, las actividades de la deshidrogenasa, proteasa y fosfatasa fueron superiores que en las de los sistemas convencionales, lo que indica una mayor actividad global microbiana y una mayor capacidad de asimilación de las proteínas y el fósforo orgánico (12). El flujo del fósforo a través de la biomasa microbiana fue más rápido en los suelos orgánicos y se absorbió más fósforo en la biomasa microbiana (14, 15). Evidentemente, los nutrientes en los sistemas orgánicos están menos disueltos en la solución del suelo y los procesos de transformación microbiana pueden contribuir al aporte de fósforo a las plantas.

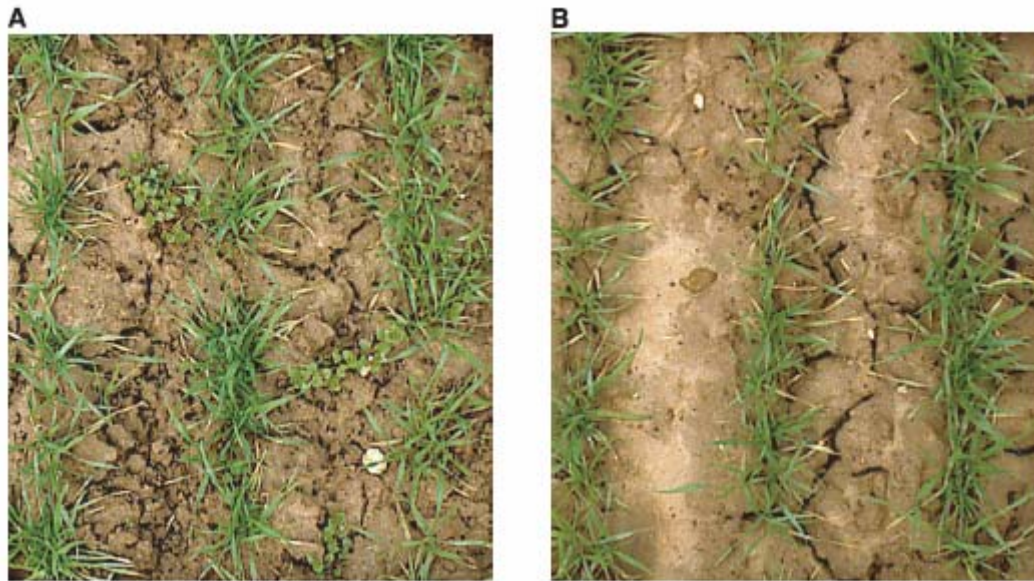


**Fig. 2.** Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en los suelos de los sistemas de agricultura DOK. Los análisis se hicieron dentro del horizonte labrado (0 a 20 cm) excepto para la fauna del suelo. Los resultados se muestran en relación con los de CONFYM (= 100%) en cuatro gráficos radiales. Los valores absolutos para el 100% son los siguientes. (A) Estabilidad de filtración, 43,3 ml min<sup>-1</sup>; estabilidad de agregados, 55% agregados estables > 250 μm; densidad bruta 1,23 g cm<sup>-3</sup>. (B) pH(H<sub>2</sub>O), 6,0; carbono orgánico, 15,8 g C<sub>org</sub> kg<sup>-1</sup>; fósforo, 21,4 mg P kg; potasio, 97,5 mg K kg<sup>-1</sup>; calcio, 1,7 g Ca kg<sup>-1</sup>; magnesio, 125 mg Mg kg<sup>-1</sup>. (C) Biomasa microbiana, 285 mg; C<sub>mic</sub> kg<sup>-1</sup>; actividad de la deshidrogenasa, 133 mg TPF kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; actividad de la proteasa, 238 mg tiroxina kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; fosfatasa alcalina, 33 mg fenol kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; sacarosa, 526 mg azúcar reducida kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>; micorriza, 13,4% de la longitud de la raíz colonizada por el hongo micorrízico (D) Biomasa de lombrices de tierra, 183 g m<sup>-2</sup>; abundancia de lombrices de tierra, 247 individuos por m<sup>-2</sup>; carábidos, 55 individuos; estafilinidos, 23 individuos; arañas, 33 individuos. No se han determinado los artrópodos en el sistema CONMIN debido al diseño del ensayo de campo. Se observaron efectos significativos para todos los parámetros excepto para la densidad bruta, C<sub>org</sub>, y el potasio (análisis de varianza, P < 0,05). Para los métodos, ver la tabla S3.

Las micorrizas, como miembros de la comunidad del suelo, mejoran la nutrición mineral de la planta y contribuyen a la formación del agregado del suelo (16). La longitud de la raíz colonizada por las micorrizas en los sistemas de agricultura orgánica fue un 40% mayor que en los sistemas convencionales (7) (Fig. 2C).

La biomasa y la abundancia de lombrices de tierra fue mayor en una relación de 1,3 a 3,2 en las parcelas orgánicas comparada con las convencionales (17) (Fig. 2D). También investigamos los artrópodos epigeos que viven encima del terreno, puesto que son predadores importantes y se consideran indicadores sensibles para apreciar la fertilidad del

suelo. La media de la densidad de la actividad de los carábidos, estafilínidos y arañas en las parcelas orgánicas fue casi el doble que en las parcelas convencionales (18) (Fig. 2 D).



**Fig. 3.** Superficie del suelo biodinámico (A) y convencional (B) en parcelas de trigo de invierno. Los restos de la actividad de las lombrices de tierra y las plántulas de las adventicias son más frecuentes en las parcelas biodinámicas. La disgregación de las partículas del suelo en las parcelas convencionales genera una superficie más suave. La distancia entre las líneas de trigo es de 0,167 m. Fuente: T. Alföldi, Instituto para Investigación de la Agricultura Orgánica [Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)].

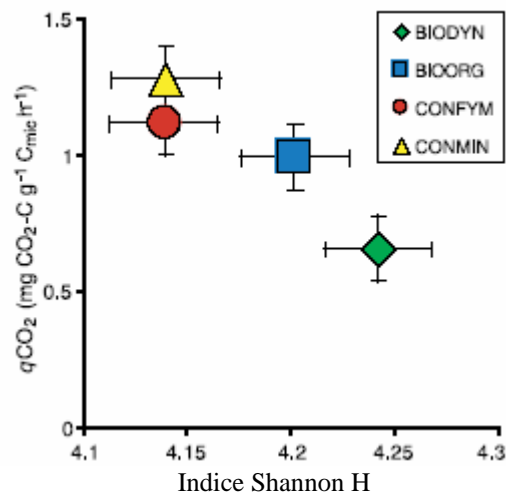
Los ecosistemas sanos se caracterizan por una alta diversidad de especies. El ensayo DOK muestra que la agricultura orgánica permite el desarrollo de una flora de adventicias relativamente diversa. Se encontraron entre nueve y 11 especies de adventicias en las parcelas de trigo gestionadas de manera orgánica y una especie en las parcelas convencionales. Entre 28 y 34 especies de carábidos se encontraron en el sistema BIODYN, 26 a 29 especies en el sistema BIOORG y 22 a 26 especies en el sistema CONFYM (18). Algunas especies amenazadas y especializadas se encontraron sólo en los dos sistemas orgánicos. Además de la presencia y diversidad de las adventicias, son probablemente, los efectos directos de los plaguicidas y la densidad de las plantas de trigo, los que más están influyendo en la actividad y diversidad de los artrópodos.

Una de las constataciones particularmente importantes, que aparece en la Fig. 4, fue el fuerte y significativo aumento de la diversidad microbiana (BIOLOG Inc., Hayward, CA) en el orden CONMIN, CONFYM < BIOORG < BIODYN y el descenso asociado en el cociente metabólico ( $qCO_2$ )(19). De acuerdo con la teoría de Odum sobre la estrategia del desarrollo del ecosistema, la relación entre la respiración total y la biomasa total disminuye durante la sucesión en un ecosistema (20). Este cociente ha sido adaptado a los organismos del suelo (21), donde la evolución de  $CO_2$  es un proceso biológico dirigido principalmente por microorganismos. El menor  $qCO_2$  en los sistemas orgánicos, especialmente en el sistema BIODYN, indica que estas comunidades son capaces de utilizar sustancias orgánicas más para el crecimiento que para el mantenimiento.



Bajo condiciones controladas, la comunidad microbiana diversa del suelo BIODYN descompuso más materia vegetal marcada con Carbono 14 que los de los suelos convencionales (22). En el campo, la fracción menos pesada de las partículas de la materia orgánica, que indican materia vegetal sin descomponer, se descompuso de forma más completa en los sistemas orgánicos (23). Por tanto, las comunidades microbianas, con una mayor diversidad en los suelos orgánicos, transforman el carbono de los restos orgánicos en biomasa a un coste energético menor, formando una biomasa microbiana mayor. En consecuencia, ya se ha citado (24) el papel funcional que tienen las diversas comunidades de plantas en el uso de los nitratos del suelo, así como la importancia de la diversidad micorrícica en la absorción de fósforo y en la productividad de la planta (25).

Los consistentes resultados de estos dos estudios (24, 25) así como el nuestro, dentro del sistema suelo-planta, apoyan la hipótesis de que una comunidad más diversa es más eficiente en la utilización de los recursos. La mejora de la actividad biológica y de la biodiversidad por encima y por debajo del terreno en las etapas iniciales de las cadenas tróficas del ensayo DOK, es probable que contribuyan positivamente al desarrollo de los niveles superiores en las cadenas tróficas que incluyen pájaros y animales más grandes. Los sistemas orgánicos muestran un uso eficiente de los recursos y una mayor diversidad de la flora y de la fauna, características éstas típicas de los sistemas maduros. Existe una correlación significativa ( $r = 0,52$ ,  $P < 0,05$ ) entre la eficacia del sistema encima del terreno (unidad de energía por unidad de producción del cultivo) y debajo del terreno (evolución de  $\text{CO}_2$  por unidad de biomasa microbiana del suelo) en el ensayo DOK. Concluimos que las rotaciones de cultivos basadas en el cultivo de leguminosas, abonadas orgánicamente y que utilizan los fertilizantes orgánicos de la propia finca, son una alternativa realista a los sistemas agrarios convencionales.



**Fig. 4.** La diversidad funcional microbiana del suelo (índice H' Shannon) y el cociente metabólico ( $q\text{CO}_2 = \text{respiración basal del suelo/biomasa microbiana del suelo}$ ) tiene una correlación inversa. Una mayor diversidad en las parcelas orgánicas se relaciona con un menor  $q\text{CO}_2$ , lo que indica una mayor eficiencia energética de la comunidad microbiana más diversa. El índice Shannon es significativamente diferente entre ambos sistemas convencionales (CONFYM, CONMIN) y el sistema BIODYN, el  $q\text{CO}_2$ , entre CONMIN y BIODYN ( $P < 0,05$ ).

## Referencias y notas

1. D. Pimentel et al., *Science* 267, 1117 (1995).
2. D. Tilman, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 96, 5995 (1999).
3. D. Pimentel et al., *Bioscience* 47, 747 (1997).
4. [www.organic.aber.ac.uk/stats.shtml](http://www.organic.aber.ac.uk/stats.shtml)
5. L. E. Drinkwater, P. Wagoner, M. Sarrantonio, *Nature* 396, 262 (1998).
6. J. P. Reganold, J. D. Glover, P. K. Andrews, H. R. Hinman, *Nature* 410, 926 (2001).
7. P. Mäder, S. Edenhofer, T. Boller, A. Wiemken, U. Niggli, *Biol. Fertil. Soils* 31, 150 (2000).
8. P. Simon, Landwirtschaftliches Zentrum Ebenrain, CH-4450 Sissach/BL, personal communication.
9. F. Offermann, H. Nieberg, *Economic Performance of Organic Farms in Europe* (University of Hohenheim, Hago Druck & Medien, Karlsbad-Ittersbach, Germany, 2000), vol. 5.
10. T. Alföldi et al., unpublished observations.
11. S. Siegrist, D. Schaub, L. Pfiffner, P. Mäder, *Agric. Ecosys. Environ.* 69, 253 (1998).
12. F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin, *Bodenbiologische Arbeitsmethoden* (Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ed. 2, 1993).
13. A. Oberson, J.-C. Fardeau, J.-M. Besson, H. Sticher, *Biol. Fertil. Soils* 16, 111 (1993).
14. A. Oberson, J.-M. Besson, N. Maire, H. Sticher, *Biol. Fertil. Soils* 21, 138 (1996).
15. F. Oehl et al., *Biol. Fertil. Soils* 34, 31 (2001).
16. S. E. Smith, D. J. Read, *Mycorrhizal Symbiosis* (Academic Press, London, ed. 2, 1997).
17. L. Pfiffner, P. Mäder, *Biol. Agric. Hortic.* 15, 3 (1997).
18. L. Pfiffner, U. Niggli, *Biol. Agric. Hortic.* 12, 353 (1996).
19. A. Fliebbach, P. Mäder, in *Microbial Communities—Functional versus Structural Approaches*, H. Insam, A. Rangger, Eds. (Springer, Berlin, 1997), pp. 109–120.
20. E. P. Odum, *Science* 164, 262 (1969).
21. H. Insam, K. Haselwandter, *Oecologia* 79, 174 (1989).
22. A. Fliebbach, P. Mäder, U. Niggli, *Soil Biol. Biochem.* 32, 1131 (2000).
23. A. Fliebbach, P. Mäder, *Soil Biol. Biochem.* 32, 757 (2000).
24. D. Tilman, D. Wedin, J. Knops, *Nature* 379, 718 (1996).
25. M. G. A. van der Heijden et al., *Nature* 396, 69 (1998).
26. Nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que han participado en el ensayo DOK, especialmente W. Stauffer y R. Frei y los grupos de agricultores. También damos las gracias a T. Boller y A. Wiemken así como a dos desconocidos por sus comentarios de gran ayuda. Este trabajo ha sido apoyado por la Oficina Federal Suiza para la Agricultura y la Fundación Científica Nacional Suiza.

## Material de Apoyo Online

[www.sciencemag.org/cgi/content/full/296/5573/1694/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/296/5573/1694/DC1)

Materiales y Métodos

Fig. S1

Tablas S1 a S5