

# APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



# Capítulo 4

## Rotaciones hortícolas y su contribución al manejo de enfermedades de suelo

Carolina Leoni

### 1. Introducción

La agricultura moderna tradicional ha experimentado procesos de intensificación y especialización asociados a un aumento del uso de energía fósil por el incremento en el uso de agroquímicos, mecanización y riego. Como consecuencia, se constatan importantes pérdidas de suelo por erosión, disminución de la materia orgánica del suelo asociada a pérdidas de estructura y capacidad de almacenamiento de agua, incrementos en los problemas de plagas y enfermedades, pérdidas de biodiversidad, y una mayor vulnerabilidad a los eventos climáticos extremos. Todos estos cambios resultan en sistemas de producción no sustentables, por lo que es necesario transitar hacia sistemas de producción alternativos. Estos deberán mantener y/o incrementar la productividad de los sistemas en el mediano y largo plazo mediante el fortalecimiento de los procesos ecológicos, la reducción de la dependencia de insumos externos no renovables y la eficiencia en el uso de los recursos (Leoni, 2013).

La rotación de cultivos es una de las estrategias más antiguas de la agricultura, tanto para el manejo de su nutrición como para el de las malezas, plagas y enfermedades, principalmente aquellas de suelo. Pero también, una adecuada rotación ayuda a mantener la estructura del suelo y reducir la erosión, brindar una oferta más regular de alimentos a lo largo del año y distribuir mejor el trabajo y el ingreso de los productores. La selección de una rotación es el balance entre criterios ecológicos y criterios prácticos para asegurar beneficios económicos en el corto y mediano plazo. Varias rotaciones –combinaciones de cultivos– pueden ser adecuadas para un determinado predio y sistema de producción, y

la elección final dependerá de las preferencias del productor y de cómo combine sus recursos productivos.

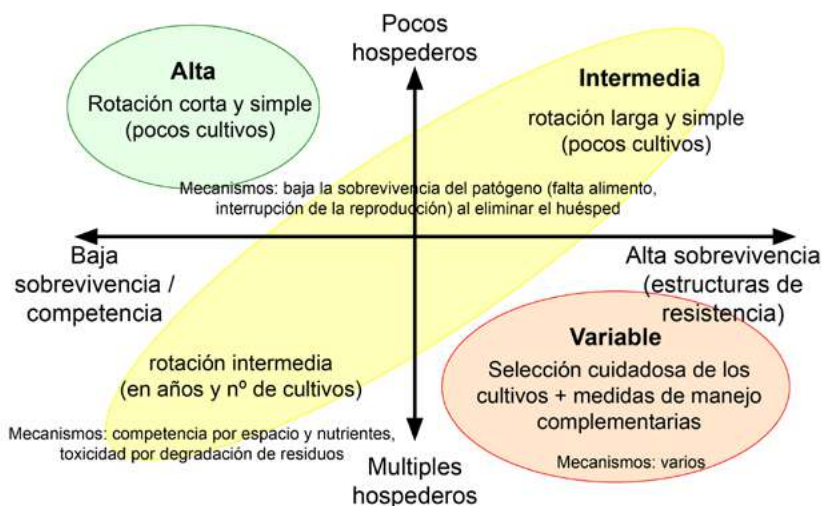
Los sistemas de producción sostenibles buscan emular el funcionamiento y la estructura de los sistemas naturales o de referencia, para lo cual es necesario un cuidadoso diseño de estos. La rotación de cultivos es una valiosa herramienta de diseño de los agroecosistemas pues proporciona biodiversidad espacial y temporal, tanto aérea como subterránea. Además, sistemas de producción sostenibles se asocian a la salud del suelo<sup>1</sup> y a su capacidad para suprimir enfermedades (van Bruggen y Semenov, 2000). El tamaño y la forma en la cual se organizan las parcelas y los cultivos, es decir cómo se diseñan una rotación y el paisaje circundante, tienen un gran impacto sobre el desarrollo de las enfermedades y la ocurrencia de plagas.

El manejo de las enfermedades de suelo no es simple. Las estrategias de control químico no han sido eficientes y los principios activos recomendados están cuestionados por su impacto negativo en el ambiente, por lo que en los últimos años muchos de ellos han sido retirados del mercado. La rotación de cultivos es una alternativa viable para el manejo de estos patógenos, pero su efectividad depende de la frecuencia de las especies vegetales hospederas de patógenos en la secuencia de cultivos y de las habilidades del patógeno para sobrevivir. Como se esquematiza en la Figura 1, es relativamente más fácil manejar los patógenos con estrecho rango de hospederos y baja habilidad de sobrevivencia que aquellos que poseen un rango amplio de hospederos y/o alta capacidad de sobrevivencia. Para el manejo de estos últimos, además de una cuidadosa selección de los cultivos integrantes de la rotación, se deberán emplear otras medidas de manejo (resistencia/tolerancia genética, control biológico, control cultural).

---

<sup>1</sup> Salud del suelo: “Capacidad sostenida del suelo de funcionar como un sistema vivo que soporte la productividad biológica, mantenga la calidad ambiental y promueva la salud de las plantas, los animales y las personas” (Larkin, 2015).

**FIGURA 1. EFECTIVIDAD DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS EN EL MANEJO DE PATÓGENOS DE SUELO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ESPECIES VEGETALES HOSPEDERAS Y DE LA ESTRATEGIA DE SOBREVIVENCIA DEL PATÓGENO**



Fuente: Modificado de Leoni (2013).

## 2. Las rotaciones y la dinámica poblacional de patógenos de suelo en sistemas hortícolas a campo

El diseño de una rotación no es simple y gran parte de los trabajos nacionales se han centrado en el impacto sobre la productividad y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Arboleya *et al.*, 2012; Alliaume *et al.*, 2013; Dogliotti *et al.*, 2004), con información limitada acerca del impacto de los cultivos sobre la dinámica de los patógenos. En general, las secuencias se diseñan buscando alternar cultivos que no sean hospederos de los mismos patógenos, lo cual no siempre es posible, especialmente para los patógenos polípagos y/o con alta capacidad de supervivencia por poseer estructuras de resistencia. Ejemplos de estos patógenos que ocasionan importantes pérdidas en los sistemas hortícolas nacionales son *Sclerotium rolfsii* y *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae*. *S. rolfsii* tiene más de 500 hospederos, forma esclerotos que pueden sobrevivir varios años

en el suelo y las enfermedades que ocasiona se desarrollan durante la temporada primavera-estival (Xu *et al.*, 2008). *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* tiene un rango de hospederos menor –es importante en los cultivos de cebolla y ajo–, pero posee varias estrategias de sobrevivencia como macro y microconidios, clamidosporas, micelio colonizando plantas sin causar enfermedad (Abawi y Lorbeer, 1972).

Con el fin de aportar al diseño de rotaciones hortícolas a campo para el sur del país, se realizó una serie de experimentos que estudiaron la dinámica de los patógenos *S. rolfsii* y *F. oxysporum* f.sp. *cepae* en diferentes situaciones productivas. En forma complementaria, dada la imposibilidad de evaluar todas las combinaciones de cultivos posibles, se realizaron simulaciones mediante modelos matemáticos simples, que permitieron definir, por ejemplo, aquellas secuencias más adecuadas para el manejo de las enfermedades estudiadas. Estas simulaciones también ayudan a seleccionar algunas rotaciones que luego son validadas a campo, reduciendo los tiempos y recursos necesarios para la investigación.

## **2.1. Efecto de la rotación en la dinámica poblacional de *Sclerotium rolfsii***

Se estudió el efecto de la sobrevivencia de los esclerotos de *S. rolfsii* luego de la incorporación de 17 abonos verdes y en tres secuencias de cultivos diferentes. A partir de los datos generados, se ajustaron dos modelos poblacionales simples que, combinados, simulan la dinámica poblacional de *S. rolfsii* bajo diferentes rotaciones. Los parámetros de los modelos se estimaron sobre la base de datos experimentales generados en macetas y en microparcelas a campo (Leoni *et al.*, 2014).

La incorporación de los abonos verdes al suelo mostró diferentes efectos sobre la capacidad de sobrevivencia de los esclerotos de *S. rolfsii*, debido a que los compuestos que liberan los tejidos vegetales al descomponerse en el suelo difieren entre las especies evaluadas. Algunos abonos verdes como sudangrass, moha, crotolaria, alfalfa, avena y trigo disminuyeron la sobrevivencia de los esclerotos, mostrando su aptitud para ser incorporados en la rotación en aquellos sitios que presentan problemas con este patógeno (Tabla 1).

**TABLA 1.** EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE DIFERENTES ABONOS VERDES EN LA SOBREVIVENCIA DE ESCLEROTOS DE *S. ROLFSII*

SOBREVIVENCIA DE LOS ESCLEROTOS	ABONO VERDE DE VERANO	ABONO VERDE DE INVIERNO
Disminuye	Sudangrass ( <i>Sorghum x drummondii</i> )	Avena blanca ( <i>Avena strigosa</i> )
	Moha ( <i>Setaria itálica</i> )	Avena negra ( <i>Avena byzantina</i> )
	Crotolaria ( <i>Crotalaria juncea</i> )	Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )
	Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )
No cambia	Maíz ( <i>Zea mays</i> )	Nabo forrajero ( <i>Brassica napus</i> )
	Girasol ( <i>Helianthus annus</i> )	Trébol rojo ( <i>Trifolium pratense</i> )
		Lupino azul ( <i>Lupinus angustifolius</i> )
Aumenta	Poroto negro ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	Lupino blanco ( <i>Lupinus albus</i> )
	Caupi ( <i>Vigna unguiculata</i> )	Vicia peluda ( <i>Vicia villosa</i> )

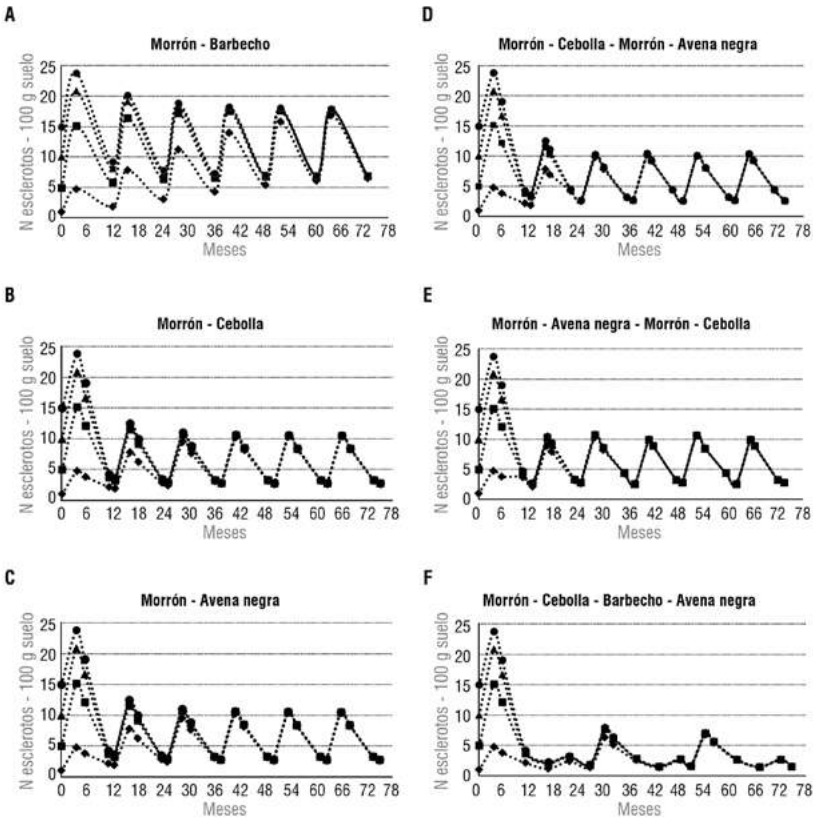
Fuente: Elaboración propia.

La dinámica poblacional de *S. rolf sii* se simuló para diversas rotaciones teóricas, donde se partía de diferentes densidades de esclerotos en el suelo y se corría el modelo hasta alcanzar un equilibrio dinámico, es decir, hasta que los cambios en las poblaciones de esclerotos fueran iguales para cada ciclo de la rotación. Inicialmente, para *el monocultivo de morrón* (Figura 2A), la situación de equilibrio se alcanzó a los 66 meses (5 años): allí, luego de un período de barbecho (en invierno), la población de esclerotos baja de 18 a 7 esclerotos/100 g de suelo, y al instalarse el cultivo de morrón (primavera-verano) se pasa de 7 a 18 esclerotos/100 g de suelo entre trasplante y fin de ciclo del cultivo. Si establecemos un umbral de 10 esclerotos/100 g de suelo como máximo tolerable que permita el desarrollo del cultivo, podemos observar que luego de tres años de monocultivo la producción estará seriamente comprometida, situación que es observable en chacras comerciales.

En rotaciones más complejas con cultivo de *morrón todos los años en el verano y alternando con cebolla y avena negra en invierno* (Figura 2D y E), el equilibrio se alcanza a los 48 meses (4 años), con densidades de esclerotos entre 3 y 11/100 g suelo. Aquí, la simulación indica que la mitad de las veces el cultivo de morrón estará comprometido por razo-

nes sanitarias. Si avanzamos a una rotación más larga con *un cultivo de morrón cada dos años y alternando con cebolla y avena negra en el invierno* (Figura 2F), la densidad de esclerotos oscila entre 1 y 7 /100 g de suelo, por debajo del umbral establecido.

**FIGURA 2.** SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE *SCLEROTIUM ROLFSSII* PARA DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS. LAS SIMULACIONES SE INICIAN EN EL MES 0 CON LA INSTALACIÓN DEL CULTIVO DE MORRÓN Y PARA CUATRO NIVELES POBLACIONALES DE *S. ROLFSSII* EN EL SUELO (1, 5, 10 Y 15 ESCLEROTOS/100 G DE SUELO)



*Nota:* Cada punto indica el valor inicial de la población de esclerotos para la fase de la rotación evaluada (cultivo de morrón, de cebolla, de avena o barbecho de verano).

*Fuente:* Modificado de Leoni et al. (2014).

## 2.2. Efecto de la rotación en la dinámica poblacional de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (Foc)

En primer lugar, se determinó la sobrevivencia y la multiplicación de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (Foc) en 13 especies vegetales diferentes a cebolla –hospedero natural del patógeno–, para conocer mejor la dinámica de Foc en el suelo y seleccionar entre ellas las más adecuadas para el manejo de la podredumbre basal de la cebolla mediante la rotación de cultivos. Luego se ajustaron los modelos de dinámica poblacional, que consideran la capacidad de cada cultivo de multiplicar el patógeno, la densidad radicular y la tasa de descomposición de las raíces. Este último parámetro determina la liberación del patógeno al suelo y su posibilidad de infectar nuevas raíces (Leoni *et al.*, 2013). Finalmente, se corrió el modelo y se validaron los resultados con datos poblacionales obtenidos en chacras comerciales de cebolla (Leoni, 2013).

Contrariamente a lo esperado, las 13 especies de plantas evaluadas multiplicaron el patógeno, aunque en diferente grado. Las especies vegetales que presentaron menor capacidad para multiplicar a Foc fueron trigo, girasol, caupí y moha, mientras que la mayor tasa de multiplicación se observó en poroto negro. Sin embargo, cuando consideramos la densidad radicular, el sudangrass fue la especie que más cantidad de unidades infectivas produjo por planta (Tabla 2).

**TABLA 2.** CAPACIDAD DE DIFERENTES ESPECIES VEGETALES DE MULTIPLICAR *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *CEPAE* (Foc) POR GRAMO DE RAÍZ Y POR HECTÁREA

CAPACIDAD DE MULTIPLICAR FOC POR GRAMO DE RAÍZ		CAPACIDAD DE MULTIPLICAR FOC POR HECTÁREA**	
Baja ( $10^2$ ufc)*	Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	Baja ( $10^9$ ufc)	Trigo
	Moha ( <i>Setaria italica</i> )		Moha
	Girasol ( <i>Helianthus annuus</i> )		Girasol
	Caupí ( <i>Vigna unguiculata</i> )		Caupí
Media ( $10^3$ ufc)	Avena ( <i>Avena sativa</i> )	Media ( $10^{10}$ ufc)	Avena
	Avena negra ( <i>Avena byzantina</i> )		Avena negra

(Continúa en página siguiente)



	Lupino azul ( <i>Lupinus angustifolius</i> )		Lupino azul
	Lupino blanco ( <i>Lupinus albus</i> )		Lupino blanco
	Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )		Tomate
	Maíz dulce ( <i>Zea mays</i> )		Poroto negro
	Maíz ( <i>Zea mays</i> )		Maíz dulce
	Sudangrass ( <i>Sorghum x drummondii</i> )		Maíz
Alta ( $10^4$ ufc)	Poroto negro ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	Alta ( $10^{11}$ ufc)	Sudangrass

**Notas:**

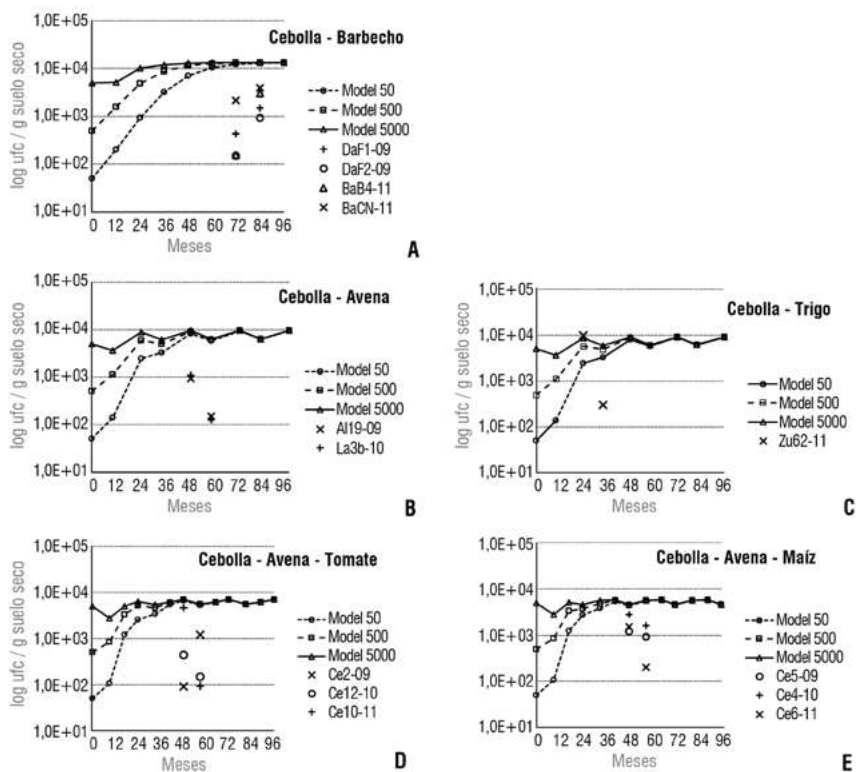
\* *ufc* = unidades formadoras de colonias.

\*\* Calculado en base a la densidad de raíces por hectárea de cada especie vegetal.

Fuente: Elaboración propia, basada en Leoni et al. (2013).

Al igual que para *S. rolfssii*, en el estudio de la dinámica poblacional de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (*Foc*) se simularon rotaciones teóricas que partían de diferentes densidades de *Foc* en el suelo, y se corrió el modelo hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Luego, esas simulaciones se validaron con datos obtenidos en chacras comerciales. Los resultados de la simulación indicaron que el *monocultivo de cebolla* lleva a un incremento de la densidad de *Foc* en el suelo, alcanzando esta densidad valores de  $1,3 \times 10^4$  ufc/g de suelo (Figura 3A). Al simular *rotaciones* con otros cultivos, el equilibrio se alcanza aproximadamente a los seis años y los valores de *Foc* en suelo son menores en un 47%, oscilando entre  $7 \times 10^3$  ufc/g de suelo para las secuencias *cebolla-avena-tomate* y *cebolla-trigo-maíz dulce* (Figura 3D y 3E). Sin embargo, en general las simulaciones sobreestiman las poblaciones de *Foc* medidas en chacras comerciales, lo cual indica la necesidad de ajustar el modelo. Por ejemplo, en este deberían incluirse factores ambientales abióticos (temperatura, humedad) y bióticos, tanto de la planta (por ejemplo, densidad de plantación) como de los microorganismos benéficos que compiten con el patógeno y que fueron aislados en las muestras de suelo de las chacras evaluadas (*Trichoderma* spp.; *Pseudomonas* fluorescentes, actinomicetes, etc).

**FIGURA 3.** SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *CEPAE* (*FOC*) PARA DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS. LAS SIMULACIONES SE INICIAN EN EL MES 0 CON LA INSTALACIÓN DEL CULTIVO DE CEBOLLA Y PARA TRES NIVELES DIFERENTES DE *FOC* EN EL SUELO



Notas: Cada punto indica el valor inicial de la población de *Foc* para la fase de la rotación evaluada (cultivo de cebolla, de avena, de trigo, de tomate, de maíz o barbecho de invierno). Los símbolos x, o y + indican las evaluaciones en chacras comerciales y se comparan con los valores de la simulación (puntos conectados por líneas) luego de alcanzado el equilibrio dinámico de *Foc* en el suelo.

Fuente: Modificado de Leoni (2013).

### 3. Conclusiones y perspectivas

Las rotaciones de cultivos nos brindan diversos servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación de poblaciones de patógenos, como analizamos en este capítulo. Se comprobó que es posible diseñar rotaciones de cultivos que minimicen las poblaciones de patógenos y permitan una producción equilibrada de alimentos a lo largo del tiempo.

Sin embargo, el diseño no es sencillo, pues la efectividad depende de la frecuencia de los hospederos en la secuencia de cultivos y de las habilidades del patógeno para sobrevivir. A partir de los resultados presentados vemos que la elección de los cultivos es crucial y no basta simplemente con “rotar familias” de cultivos –por ejemplo, alternar gramíneas y leguminosas–, ya que cultivos de una misma familia pueden tener efectos contrapuestos (Tabla 1) o magnitudes muy diferentes (Tabla 2). De los resultados surge también que podemos emplear como abono verde de invierno otras especies no “tradicionales”, por ejemplo, trigo en lugar de avena, tanto para el manejo de *S. rolfsii* como de *Foc*.

Si bien el diseño de las rotaciones no es sencillo, es necesario continuar y profundizar en el estudio de las interacciones bióticas y abióticas que se establecen en cada rotación. Debemos conocer más acerca de qué cultivos y secuencias son promotores de la salud del suelo y, por ende, del sistema. Para ello debemos saber, entre otros factores, cómo cambia el microbioma<sup>2</sup> del suelo y, más particularmente, cómo podemos favorecer las comunidades promotoras del crecimiento y las antagonistas a los patógenos, de forma de contribuir al establecimiento de suelos supresivos<sup>3</sup> a enfermedades. No considerar estas interacciones puede explicar, por ejemplo, los desvíos en los modelos presentados en este trabajo (Figura 3). Constituye un gran desafío incluir esta información en los nuevos modelos que desarrollemos para explorar potenciales rotaciones hortícolas antes de implementarlas en el campo.

---

2 Microbioma: es la comunidad microbiana que ocupa un espacio definido por sus propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, el suelo). Incluye además los elementos estructurales y metabólicos de los microorganismos, y material genético. Todo esto resulta en la formación de un nicho ecológico específico (Berg *et al.*, 2020).

3 Un suelo supresivo es aquel en el cual no se desarrolla la enfermedad, aunque estén presentes el huésped y el patógeno y las condiciones ambientales sean las adecuadas.

## Referencias

**Abawi, G. S. y Lorbeer, J. W.**

(1972), "Several aspects of the ecology of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae*", en *Phytopathology*, 62, pp. 870-876.

**Alliaume, F., Rossing, W. A. H., García, M., Giller, K. E. y Dogliotti, S.**  
(2013), "Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms", en *European Journal of Agronomy*, 46, pp. 10-19.

**Arbolea, J., Gilsanz J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M. y Guerra, S.**  
(2012), "Minimum tillage and vegetable crop rotation", en *Agrociencia Uruguay* (número especial), 16(3), pp. 62-70.

**Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D. Cernava, T., Champomier Vergès, M. C. et al.**

(2020), "Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges", en *Microbiome*, 8:103. DOI: 10.1186/s40168-020-00875-0.

**Dogliotti, S., Rossing, W. A. H. y van Ittersum, M. K.**

(2004), "Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay", en *Agricultural Systems*, 80, pp. 277-302.

**Larkin, R. P.**

(2015), "Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management", en *Annual Review of Phytopathology*, 53, pp. 199-221.

**Leoni, C.**

(2013), *Crop rotation design in view of soilborne pathogen dynamics. A methodological approach illustrated with Sclerotium rolfsii and Fusarium oxysporum f.sp. cepae*, PhD tesis, Universidad de Wageningen, Wageningen, Países Bajos, 173 pp.

**Leoni, C., de Vries, M., ter Braak, C. J. F., van Bruggen, A. H. C. y Rossing, W. A. H.**

(2013), "*Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* dynamics: in-plant multiplication and crop sequence simulations", en *European Journal of Plant Pathology*, 137, pp. 545-561.

**Leoni, C., ter Braak, C. J. F., Gilsanz, J. C., Dogliotti, S., Rossing, W. A. H. y van Bruggen, A. H. C.**

(2014), "*Sclerotium rolfsii* dynamics in soil is affected by crop sequences", en *Applied Soil Ecology*, 75, pp. 95-105.

**van Bruggen, A. H. C. y Semenov, A. M.**

(2000), "In search of biological indicators for soil health and disease suppression", en *Applied Soil Ecology*, 15, pp. 13-24.

**Xu, Z., Gleason, M. L., Mueller, D. S., Esker, P. D., Bradley, C. A., Buck, J. W., Benson, D. M., Dixon, P. M. y Monteiro, J. E. B. A.** (2008), “Overwintering of *Sclerotium rolfsii* and *S. rolfsii* var. *delphinii* in different latitudes of the United States”, en *Plant Disease*, 92, pp. 719-724.