

# Modelado mediante Sistemas Multiagentes de la redistribución espacial de un contaminante minoritario en suelo, por acción de la cobertura vegetal

Modeling using Multi-Agent Systems of spatial redistribution of a minor contaminant in soil through the action of vegetation cover

Presentación: 12/08/2024

## **Natalia Carolina Bustos**

Facultad Regional Córdoba (UTN)

[Nataliacaruline@hotmail.com](mailto:Nataliacaruline@hotmail.com)

## **Claudia Marina Sánchez**

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (UNC)

Facultad Regional Córdoba (UTN)

[Claudiamarina70@gmail.com](mailto:Claudiamarina70@gmail.com)

## **Javier Britch**

Facultad Regional Córdoba (UTN)

[javierbritch@hotmail.com](mailto:javierbritch@hotmail.com)

## **Resumen**

En este trabajo se presenta un modelo de Sistema Multiagentes donde se describen agentes “vegetación” en presencia de un contaminante, distribuidos uniformemente en un hábitat. Cada agente vegetación se modela con un crecimiento sigmoide y posee biomasa aérea y radicular reguladas por la relación alométrica raíz/parte aérea. Los agentes se encuentran inicialmente distribuidos en parches y presentan una densidad superficial de biomasa total inicial, pudiendo de esta manera crecer, reducirse o inclusive desaparecer del hábitat. Se modela también, el ingreso del contaminante al agente vegetación desde la raíz, su distribución, acumulación y retorno al sistema si el agente vegetación desaparece del hábitat. Este modelo permite mostrar la evolución temporal de los parches y el comportamiento del contaminante. Se estudian variables de interés ecosistémico tales como la distribución espacial del agente vegetación, el contaminante minoritario y además su redistribución debido a la cobertura vegetal.

**Palabras claves:** Ecosistemas, Sistemas Multiagentes, Contaminación.

## **Abstract**

In this work a Multi-Agent System (MAS) model is presented where "vegetation" agents are described in the presence of a contaminant, uniformly distributed within a habitat. Each vegetation agent is modeled with sigmoidal growth and possesses both aerial and root biomass, regulated by the root/aerial part allometric relationship. The agents are initially distributed in patches and exhibit an initial total biomass surface density, allowing them to grow, shrink, or even disappear from the habitat. The model also simulates the uptake of the contaminant by the vegetation agent through the roots, its distribution, accumulation, and return to the system if the vegetation agent disappears from the habitat. This model allows for the temporal evolution of patches and the behavior of the contaminant to be observed. Ecosystem variables of interest, such as the spatial distribution of the vegetation agent, the minor contaminant, and its redistribution due to vegetation coverage, are also studied.

**Keywords:** Ecosystems, Multi-Agent Systems, Contamination.

## **Introducción**

La presencia de metales pesados en suelos, constituye un serio problema ambiental (Hermoso et al., 2008). Muchos de estos metales, son micronutrientes esenciales para plantas y animales (Coyago y Bonilla, 2014, Rodríguez et al., 2019), pero

en concentraciones altas pueden causar toxicidad a causa de su naturaleza no biodegradable. Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli et al., 2004). La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea (Yin et al., 2003). Algunos estudios han mostrado que el Si, Cu, Ni y Co presentan movilidad elevada; As, Sb, Mn y Fe movilidad baja; Ba muy baja y Pb, Cd y Ag prácticamente inmóviles (Collado Fernández, 2002). En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir varias vías diferentes (García, I. y Dorronsoro, C., 2005), siendo la absorción por las plantas la de interés en este estudio, ya que permite la incorporación de los contaminantes a la cadena trófica (Prieto et al., 2009).

Las plantas han desarrollado mecanismos muy específicos como las raíces para absorber, translocar y acumular nutrientes (Lasat, M., 2000); sin embargo, algunos metales y metaloides son absorbidos, translocados y acumulados debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos esenciales (Souza et al., 2005). La fitotoxicidad ocasionada por las altas concentraciones de metales pesados da como resultado crecimiento débil de las plantas, reducción en la captación de los nutrientes, desórdenes en el metabolismo y estrés oxidativo. Este último, puede afectar la fotosíntesis y los procesos reproductores, reducir la producción de clorofila e interferir con el proceso metabólico y disminuir la germinación de las semillas (Smith et al., 2010).

Por lo tanto, una correcta descripción de la distribución de las raíces y su relación con la parte aérea pueden ayudar a determinar la absorción de contaminantes desde el suelo y su incorporación a la cadena trófica o establecer estrategias de fitorremediación ambiental (Shah et al., 2020).

## Metodología

Se elaboró un código en el entorno Matlab que simula un hábitat plano circular de radio  $R_h$  (Radio de hábitat) donde se encuentran agentes vegetación, los cuales pueden interactuar con contaminantes minoritarios distribuidos uniformemente en el hábitat. Los agentes vegetación se distribuyen en parches al azar en este hábitat y presentan una densidad superficial de biomasa inicial, también al azar, en un intervalo definido por densidades mínima y máxima ( $\rho_{min}$ ,  $\rho_{max}$ ). Los agentes vegetación presentan un ritmo de crecimiento sigmoideal (Yin et al., 2003), el cual determina su esperanza de vida y puede ser regulada externamente, ajustando los parámetros del crecimiento. Los agentes vegetación poseen una biomasa aérea y radicular. La parte aérea del parche, la cual tiene inicialmente al azar un radio  $R_f$ , regula el crecimiento y reproducción del agente vegetación. El crecimiento del agente aumenta en cada paso temporal de la simulación ( $\Delta T$ ). La densidad superficial de biomasa aérea de cada parche se calcula en cada  $\Delta T$  y si ésta es mayor a  $\rho_{max}$ , su radio aumenta para que la densidad sea igual a  $\rho_{max}$ . Análogamente, si la densidad del parche es menor a  $\rho_{min}$  su radio disminuye para que la densidad sea igual a  $\rho_{min}$ . El agente vegetación produce una semilla, si la densidad de la parte aérea de cada parche supera la densidad máxima y además su radio es mayor a  $R_{fmax}$ . La semilla se introduce en el hábitat alrededor de su progenitor y germina al comienzo de cada ciclo para pasar al estatus de agente vegetación. La parte radicular del agente vegetación posee inicialmente al azar, un radio  $R_r$ . El crecimiento o decrecimiento de la raíz está regulado por la relación alométrica raíz/ parte aérea (Di Benedetto, M. y Tognetti, j.; 2016). El modelo incorpora la competencia entre agentes vegetación a través de sus raíces. Si los radios de las raíces en cada paso temporal se intersecan, gana el agente que posea mayor biomasa mientras que el agente vegetación perdedor reduce su biomasa. De esta manera los parches de cada agente vegetación pueden crecer o reducirse hasta inclusive desaparecer. Ajustando la cantidad de parches, su radio y el rango de densidades se pueden representar situaciones de fragmentación de la cobertura vegetal de degradación continua o de pérdida absoluta (Sánchez et al, 2023).

Por otra parte, se modela el contaminante minoritario como una partícula puntual con distribución uniforme cuya movilidad relativa es nula (Collado Fernández, 2002). La absorción de éste se realiza a través de la parte radicular del agente. Si la distancia entre el agente vegetación y el contaminante es menor a  $R_r$ , este último es absorbido por el agente y se acumula en un contador de contaminantes, de tal manera que si el agente vegetación desaparece del hábitat los contaminantes acumulados retornan al mismo, en la posición del agente donde estaban acumulados.

## Resultados y análisis

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la simulación en base a un conjunto de parámetros, en unidades arbitrarias, y datos iniciales para ejemplificar la información obtenida. Los mismos se consignan en la Tabla 1.

El ritmo de crecimiento de los agentes fue ajustado para que la esperanza de vida de cada agente vegetación sea aproximadamente de un ciclo (365 pasos temporales en la simulación) y la relación alométrica raíz/parte aérea se ajustó según la bibliografía (Di Benedetto, M. y Tognetti, j.; 2016). Por otra parte, el modelo contempla una competencia entre

raíces baja (los agentes perdedores de la competencia reducen su biomasa en un diez por ciento).

Tabla 1. Valores de los parámetros utilizados en las simulaciones

Tamaño del hábitat $R_h = 100$	Densidad máxima $\rho_{max}$	Densidad mínima $\rho_{min}$	Radio biomasa aérea máximo $R_{fmax}$	Radio biomasa aérea mínimo $R_{fmin}$	Radio biomasa raíz máximo $R_{rmax}$	Radio biomasa raíz mínimo $R_{rmin}$
Agente Vegetación $N_p = 100$	1,6	0,4	6	1	5	2
Contaminante $N_c = 1500$						

La figura 1 muestra las posiciones y tamaños iniciales de los agentes vegetación (en color verde), así como las posiciones iniciales de los contaminantes (puntos grises) en el hábitat.

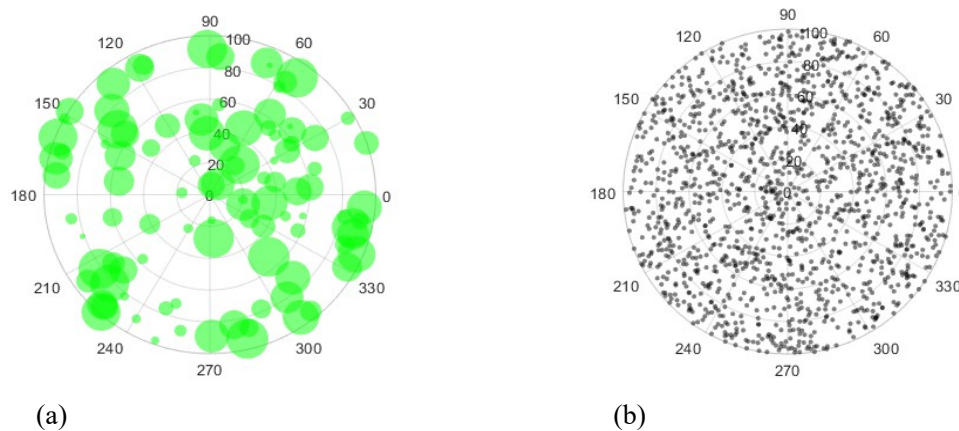


Figura 1. (a) posiciones y tamaños iniciales de los agentes vegetación (verde). (b) posiciones iniciales de los contaminantes (puntos grises).

La figura 2 muestra una secuencia para tres tiempos (100, 900, 3500 pasos temporales) de la evolución del sistema agente vegetación-contaminante. Se muestra en la figura 2.a, los parches de vegetación y los radios de las raíces. Los colores muestran las distintas densidades de los agentes vegetación. En la figura 2.b, se muestra las posiciones de los contaminantes (puntos grises). Podemos observar a partir de la figura 2.a, el crecimiento y decrecimiento de los parches, la desaparición de éstos del hábitat, el nacimiento de nuevos agentes vegetación y la redistribución del paisaje en el hábitat. Note el crecimiento de los parches más allá del límite inicial dado. Por otra parte, en la figura 2.b, podemos observar vaciamiento de contaminantes en las zonas donde hay presencia de parches de vegetación por la acumulación de éstos en los agentes. Note, que la desaparición de los parches de vegetación produce acumulación de contaminantes (puntos negros). Es decir, al desaparecer el agente del hábitat, el contaminante acumulado, retorna al hábitat en la misma posición del agente, conjuntamente con todos los contaminantes acumulados por éste hasta ese paso temporal. Se puede notar una redistribución del contaminante que, aunque fue modelado fijo en el hábitat, cambia su posición e incluso en algunos casos excede el límite inicial de éste.

Para caracterizar cuantitativamente las distribuciones espaciales observadas, el código implementado calcula para cada unidad de tiempo, posición promedio y desviación estándar  $\sigma$  (Papoulis, 1991; Spiegel y Stephens, 2009). La figura 3 y figura 4 muestran la evolución de estos parámetros sobre la ordenada (eje vertical) para los agentes vegetación y los contaminantes, respectivamente.

Se puede notar para el agente vegetación, apartamientos de los dos momentos de la distribución espacial estudiados respecto de los correspondientes a una distribución espacial homogénea. En la figura 3, se observa que la distribución de los agentes vegetación presenta con mayor frecuencia desplazamientos hacia valores negativos de la ordenada, lo que sugiere un cambio en la distribución de los parches y el paisaje del hábitat. Por otra parte, para los contaminantes, podemos observar que el valor medio de la ordenada es cercano a cero para los primeros pasos temporales, presentando fluctuaciones moderadas a medida que el sistema evoluciona. En el recuadro de la figura 3, se muestra otra corrida del modelo. Note que, para esta corrida, el desplazamiento de los agentes vegetación es mayor a valores positivos de la ordenada, poniendo en evidencia la naturaleza estocástica del modelo. En la figura 4 para los agentes vegetación, se observa que la desviación estándar crece hacia valores por encima del valor asignado inicialmente al hábitat, lo que indica la colonización de territorio de los agentes más allá del límite inicial.

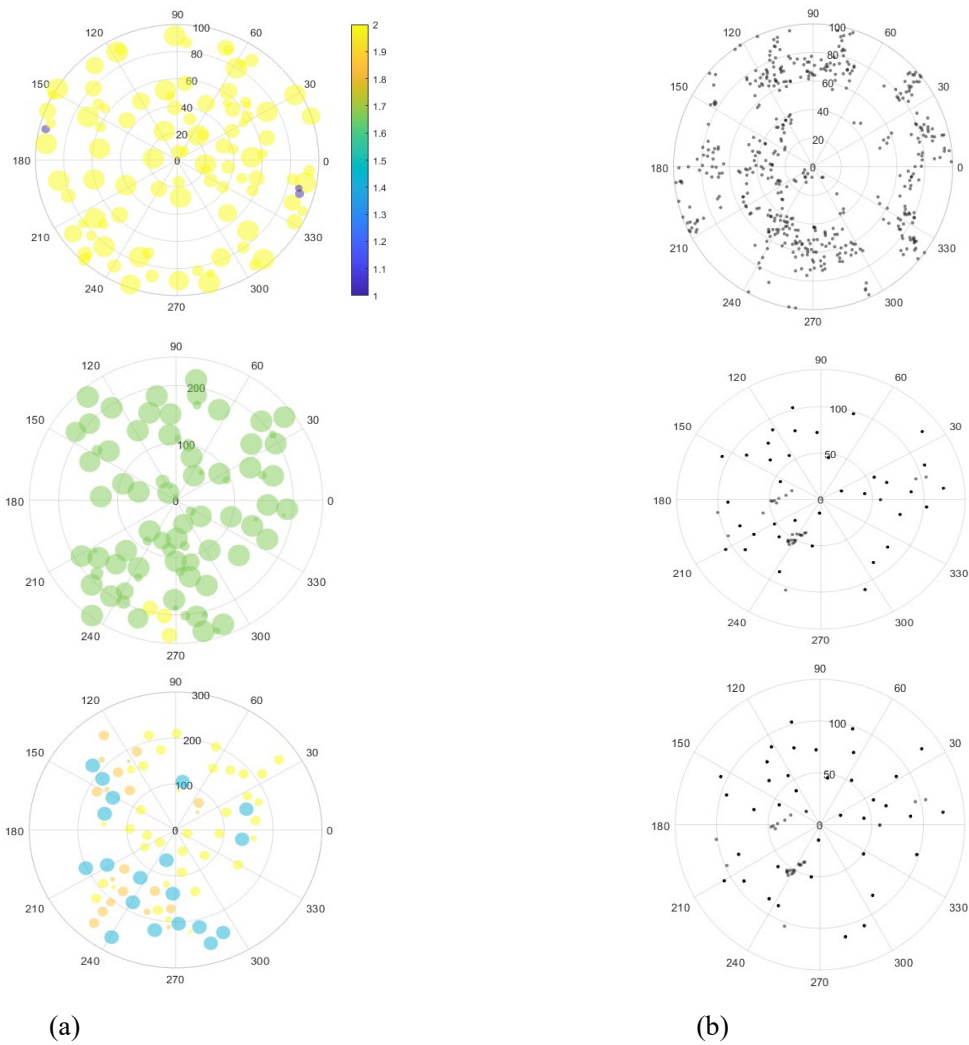


Figura 2. Secuencia temporal para tres tiempos distintos (100, 900, 3500 pasos temporales)  
 (a) Agentes vegetación (b) Contaminante (puntos grises).

Por otra parte, la desviación estándar para los contaminantes no presenta fluctuaciones pronunciadas como las de los agentes vegetación, lo que sugiere que, aunque los contaminantes pueden redistribuirse, acumularse e inclusive en algunos casos, exceder el límite inicial del hábitat debido a la cobertura vegetal, su migración a otras áreas no es significativa para los valores de los radios de las raíces propuestos.

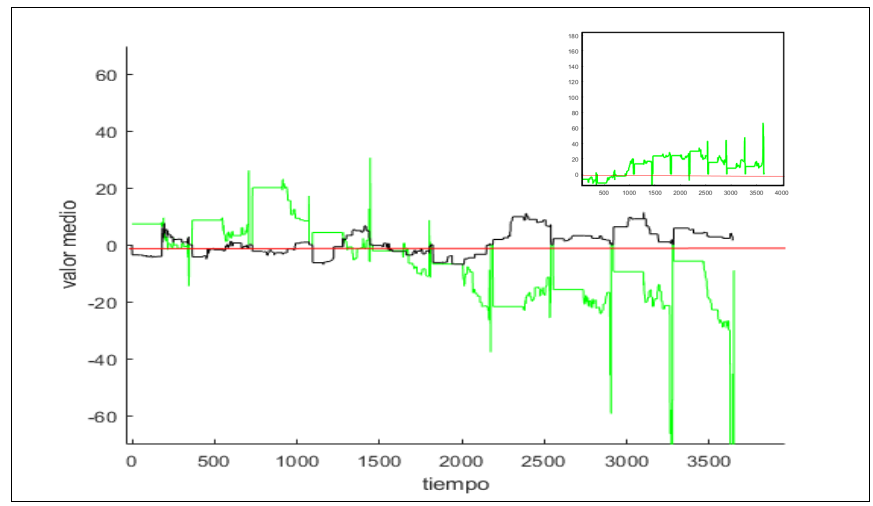


Figura 3. Evolución temporal del análisis estadístico de la distribución espacial de los agentes vegetación (en verde) y el contaminante (en negro) para el valor medio de la ordenada.

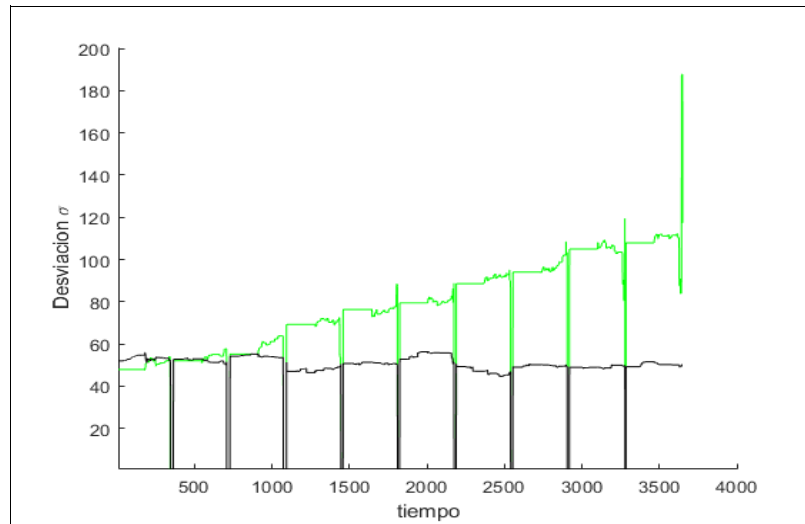


Figura 4. Evolución temporal del análisis estadístico de la distribución espacial de los agentes vegetación (en verde) y el contaminante (en negro) para la desviación estándar,  $\sigma$ .

## Conclusiones y perspectivas

Se desarrolló un código en Matlab para un sistema Multiagente que presenta agentes vegetación y contaminantes en un hábitat plano circular. Se modeló el ritmo de crecimiento de la biomasa del agente vegetación de tipo sigmoideal. Además, se tuvieron en cuenta relaciones alométricas que vinculan la parte aérea y la parte radicular para el crecimiento, reproducción y desaparición del hábitat de los agentes vegetación.

Los resultados obtenidos han sido razonables y satisfactorios. El análisis de los mismos sugiere una mayor exploración de la relación entre el radio de la raíz del agente y la captación de contaminantes. Raíces de radios mayores a los considerados podrían capturar más contaminantes, pero un estudio más profundo de la relación alométrica raíz/parte aérea y la competencia entre raíces, es necesario para conocer límites máximos de crecimiento de las mismas.

Por otra parte, la versatilidad del código permitirá estudiar una descripción más próxima a especies vegetales abundantes en sistemas ecoproductivos y/o silvopastoriles y la complejización mediante el agregado de otro agente móvil representativo de un consumidor de primer orden a través del cual puede ocurrir biomagnificación. El modelo puede también, ser utilizado como una herramienta potencial para la planificación de un tratamiento de fitorremediación de suelo o estudiar la distribución de micronutrientes posibilitando la planificación de la aplicación temporal y espacial de fertilizantes.

## Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) por el apoyo a través del proyecto PID "Aproximación al Modelado Ecosistémico de la Relación Presa – Predador Mediante Sistemas Multiagente" y a la UTN – Facultad Regional Córdoba donde realizamos nuestro trabajo.

## Referencias

- Coyago, E., Bonilla, S. (2014). "Absorción de plomo de suelos altamente contaminados en especies vegetativas usadas para consumo animal y humano". *La Granja: Revista de ciencias de la vida*, 23, 35-46.
- García, I. y Dorronsoro, C. 2005. "Contaminación por metales pesados". En *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Disponible en <<http://edafologia.ugr.es>>
- Hermoso de Mendoza García, M., Solres Rodríguez, F., Pérez López, M. (2008). "Los mamíferos salvajes terrestres como bioindicadores: nuevos avances en toxicología". *Observatorio Medioambiental*, 11, 37-62.
- Lasat M. (2000). "Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues". *J. Hazard Subst Res* 2, 1–25.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. and Toro, L. (2004). "Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series". *Environmental Pollution*, 132, 189-201.
- Papoulis, A (1991) "Probability, random variables, and stochastic processes" 3er edición. ISBN 0-07-048477-5.

Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., y Prieto García, F. (2009). "Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10,1-3.

Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). "La contaminación del suelo: una realidad oculta". Roma, FAO.

Sánchez C., Bustos, N. Brusa, D., Re, M.; Britch, J., (2023). "Modelado de la dinámica poblacional en un ecosistema simple compuesto de una cobertura vegetal y un consumidor primario mediante un sistema multiagentes.". *Jornadas de Ciencias y Tecnología. AJEA* (26). Disponible en < <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1301/1214>>.

Shah, V., y Daverey, A. (2020). "Environmental technology and innovation phytoremediation: a multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil". *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100774.

Smith E.S., Christophersen M.H., Pope S., y Andrew S.F. (2010). "Arsenic uptake and toxicity in plants: integrating mycorrhizal influences". *Plant Soil*. 327, 1-21.

Souza F.J., Dolder H. y Cortelazzo A.L. (2005). "Effect of excess cadmium and zinc ion son roots and shoots of maize seedlings". *J. Plant Nutr.* 28, 1923-1931.

Spiegel, M y Stephens, L (2009) "Estadística" 4ta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores,S.A. ISBN-13: 978-970-10-6887-8

Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E.A., Vos, J., Spiertz, H.J. (2003). "A flexible sigmoid function of determinate growth". *Annals of Botany* 91,3, 361-371.