

El suelo desde una mirada sistémica y su efecto en la seguridad alimentaria

Luis Paola León Romero ¹ ORCID 0009-0006-7815-6947
Mario Aguilar Fernández ² ORCID 0000-0003-2621-8692
Misaela Francisco Márquez ² ORCID 0000-0002-5464-6478
Instituto Politécnico Nacional ¹ ESIME, ² UPIICSA

lleonr2100@alumno.ipn.mx

Resumen— Los suelos como sistemas vivos son un complejo de elementos que se interconectan, generando vida mediante propiedades emergentes y entrópicas, cuya salud y nutrición juegan un papel importante en el desarrollo y crecimiento de las plantas y por ende en la producción de alimentos. El propósito de este comunicado se enfoca en resaltar la importancia de la dinámica sistémica del suelo en la seguridad alimentaria. Desde el uso de mapas causales que permita apreciar las variables principales y las conexiones que entre ellas se producen teniendo impacto en la producción de los alimentos. Este estudio es cualitativo con alcance descriptivo correlacional. Se distinguen 3 etapas en el desarrollo de esta investigación, 1) diseño de la investigación 2) organización de la información 3) síntesis de los resultados. El resultado permite entender la integración de las variables para crear conocimiento holístico y complejo, útil para la toma de decisiones dentro de la relación activa desde la dimensión de seguridad alimentaria, de cara a los procesos agroalimentarios y productivos del uso del suelo, además proporciona un decálogo de las mejores prácticas en los suelos agrícolas para una seguridad alimentaria sostenibles.

Palabras Clave —Análisis sistémico, maíz, seguridad alimentaria, sostenibilidad agrícola, suelo.

Abstract- Soils, as living systems, consist of a complex network of interconnecting elements that generate life through emergent and entropic properties. The health and nutrition of soils are crucial for the development and growth of plants, which in turn affects food production. This communication emphasises the significance of soil system dynamics in relation to food security. By utilising causal maps, we can understand the main variables and their interconnections that impact food production. This study is qualitative with a descriptive correlational scope and consists of three stages: 1) research design, 2) information organisation, and 3) synthesis of results. The findings provide insights into the integration of variables, contributing to a holistic and complex understanding that is valuable for decision-making within the context of food security and offers a decalogue of best practices for managing agricultural soils to promote sustainable food security.

Keywords: Systemic analysis, maize, food security, agricultural sustainability, soil.

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos vistos como un sistema abierto, dinámico y complejo tienen elementos que se interconectan de distintos

modos por un propósito, cuya interacción produce propiedades emergentes que pudieran lograr su degradación o adaptabilidad a los cambios y reacciones entre los elementos. La sinergia de estos elementos determina la salud del suelo [1]. Desde un enfoque sistémico, se estudian las propiedades estructurales, fisicoquímicas y biológicas que interactúan en los suelos para garantizar la productividad y sostenibilidad de los cultivos [2], en especial el maíz como alimento básico de la dieta en México y otros países en el mundo, así como también materia prima en diversos procesos industrializados[3,4].

Sin embargo, la degradación del suelo, el uso excesivo de insumos químicos y el cambio climático representan desafíos críticos que requieren soluciones integradas, debido algunas prácticas agrícolas intensivas que han puesto en riesgo su sostenibilidad, afectando la productividad y la seguridad alimentaria [5], en palabras de Ran *et al.* [6] las principales amenazas globales para el futuro de la seguridad alimentaria son las tensiones ambientales. En consecuencia, la poca comprensión de las relaciones sensibles entre las partes que integran el sistema conlleva a la interrupción de los vínculos en este caso entre las propiedades del suelo, microorganismos vivos, las raíces de los cultivos, el medio ambiente, y los recursos económicos de los productores, por ende, en el enfoque de las políticas y estrategias para su recuperación [2,7].

Es por ello por lo que el objeto de este estudio se centra en analizar la dinámica sistémica del suelo, y el impacto de sus prácticas frente a la seguridad alimentaria, como sistema resiliente y sostenible.

Revisión de literatura

Se han realizado muchas investigaciones en las que se correlacionan algunos elementos químicos presentes en el suelo y su efecto en los rendimientos de los cultivos. Farina *et al.*, Sarfraz *et al.* y Wang *et al.* [4,8,9] argumentan que el uso de fósforo y nitrógeno como elementos principales para el crecimiento del cultivo, por lo que se ha buscado tener una mejor tasa de fijación en el suelo. Por su parte Reinhardt y Nel [10] indican que los efectos de una alta concentración de fósforo sobre el desarrollo de la planta y crecimiento del cultivo puede ser nociva, así también Yu *et al.* [11] centra su investigación en la reacción de los elementos zinc y fósforo presentes en el suelo, como elementos antagónicos y que ejercen influencia en el rendimiento del cultivo de maíz.

Otros estudios resaltan el proceso del flujo del dióxido de carbono del suelo (respiración), para minimizar el impacto en el calentamiento global, sabiendo que el carbono está en doble cantidad en el suelo más que en la atmósfera, el cual es útil para el proceso de descomposición y mineralización de la materia orgánica, respiración de las raíces y de la rizosfera [12]. También se ha analizado el aspecto biológico del suelo determinado por las comunidades bacterianas, que en relación con las propiedades físicas y químicas y las actividades antropogénicas alteran la biodiversidad del suelo [13], así también se ha analizado el impacto de microorganismos del suelo en la producción de maíz [6]. Algunas investigaciones consideran los aspectos del clima y la humedad del suelo en el proceso de descomposición [14], por su parte Masiello *et al.* [15] pone de manifiesto que algunos hongos patógenos del suelo son los causantes de las podredumbres de mazorcas y tallos, sin embargo, también pueden existir hongos benéficos, a tal punto de disminuir los perjudiciales como citan [16,17].

Por otro lado, Basamba *et al.*, Kulagowski *et al.*, Mendes *et al.* [18–20] hacen énfasis en las prácticas sostenibles de agronomía favorables para el rendimiento del cultivo, como el uso de la agricultura de conservación y el uso de semillas mejoradas para la adaptación a condiciones del clima. Magaia *et al.* [21] permite ver la sinergia entre el uso de fertilizantes y el agua produciendo un mejor rendimiento del cultivo de maíz, Berry y Mallett [22] sostienen que el uso de rastrojo sobre la superficie del suelo regula la temperatura del suelo, evitando la erosión y favoreciendo la retención de agua, pero esta práctica no se recomienda cerca del área de las semillas para que no ralente el proceso de germinación, crecimiento y desarrollo del cultivo. Además, Kaminskyi *et al.* [23] analizan el sistema de labranza, con el de fertilización y rotación de cultivos de cereales, para rehabilitar el estado físico, agroquímico biológico del suelo y generar impacto en los procesos fisiológicos de los cultivos, resalta el uso del enfoque sistémico del cultivo y la fertilización para el potencial biológico de la planta.

Sin embargo, Rahman *et al.* [24] deja ver que la mayoría de las emisiones de óxido nítrico son producto de las actividades agrícolas en un 81% debido a los residuos que produce, por el mal manejo de los recursos como es el caso del exceso de nitrógeno como fertilizante, generando un impacto muy negativo sobre la capa de ozono. El cambio climático también tiene su impacto, debido a las sequías e inundaciones interfiriendo en la compactación del suelo, exponiendo los cultivos a estrés ambiental que puede en el caso de anegamiento podrir las raíces debido a su incapacidad de absorción del oxígeno, la compactación del suelo produce daño estructural de la raíz modificando su longitud, grosor, dirección de crecimiento y el número de raíces produciendo cambios fisiológicos en la planta afectando su crecimiento, desarrollo y productividad [25,26].

A pesar de la creciente preocupación por la sostenibilidad agrícola, todavía existen vacíos en la comprensión de cómo las propiedades sistémicas del suelo influyen en la productividad del maíz y en la seguridad alimentaria. Los estudios indican la relación de algunos elementos o propiedades, pero no se menciona la salud del suelo de forma sistémica frente a la

producción de alimentos. Este estudio busca abordar estos desafíos, proponiendo un enfoque sistémico desde las propiedades de los sistemas.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

Este estudio se sostiene en un enfoque cualitativo de orden descriptivo y correlacional, con carácter sistémico, útil para representar la dinámica, complejidad y la comprensión holística [27] del suelo como sistema de estudio frente la seguridad alimentaria. Para el desarrollo de este trabajo se desglosan 3 etapas, que abarcan el diseño de búsqueda de la información, organización de la información, para proceder con el diseño del modelo sistémico causal como se muestra en la Figura 1.

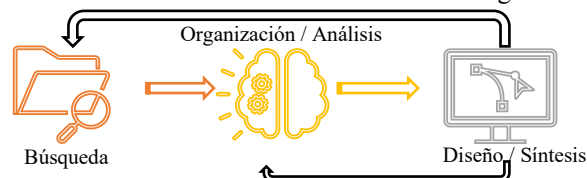


Figura 1. Secuencia metodológica

Etapas:

Etapas 1. Búsqueda: se recopila información haciendo uso de la base de datos web of science. Con ayuda de la metodología prisma [28], se filtra información utilizando palabras claves como: “food security” and “soil” and “maize” and “Soil-plant System”; en un rango de años entre 2019 y 2025, se utiliza solo documentos open acces tipo artículos de investigación, criterios de inclusión artículos que tengan al menos dos de las tres palabras claves en sus keywords, además, que sean del área de investigación de agricultura y ciencias del ambiente y suelo. Se seleccionan investigaciones que permitan responder a la pregunta: ¿cómo es la intervención de la calidad del suelo en la seguridad alimentaria?, de 83 que arroja la búsqueda solo 15 se contemplan para este estudio, los demás surgen por bola de nieve.

Etapas 2. Organización de la información: se clasifican las variables relevantes sobre las que se sustenta la calidad del suelo y la seguridad alimentaria, a) se listan todas las variables. b) se agrupan e identifican los vínculos que las interconectan visto como un solo sistema complejo emergente, autoorganizado y dinámico que coevoluciona.

Etapas 3. Diseño. Se utiliza el software de modelación sistémica Ven-sim PLE ® 9.3.5 para crear el mapa causal entre las variables identificadas, indicando los bucles y las interacciones positivas o negativas entre los mismos. El Diagrama de Buclé Causal, es una herramienta metodológica que nos permite modelar las complejidades del sistema [29,30] en relación con la seguridad alimentaria en función de la calidad del suelo agrícola.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo como un sistema vivo manifiesta ciertas propiedades sistémicas que impactan en el cultivo de maíz y en la seguridad alimentaria. La gestión adecuada permite

conservar su estructura, reducir la entropía, mantener la homeostasis, potenciar la sinergia y generar propiedades emergentes que beneficien la producción de maíz. La Tabla 1 relaciona las variables principales y se identifica la propiedad sistémica que lo representa.

Tabla 1. Propiedades sistémicas en el suelo como actor en la producción de maíz.

Variables	1	2	3	4
Prácticas sostenibles	(+)	(+)	(0)	Sinergia
Selección de semillas	(0)	(+)	(+)	Estructura
Uso de agroquímicos	(-)	(-)	(-)	Entropía
Monocultivos	(-)	(-)	(-)	Entropía
Uso de cobertura vegetal	(+)	(+)	(0)	Sinergia
Rotación de cultivos	(+)	(+)	(+)	Homeóstasis
Labranza mínima	(+)	(0)	(0)	Homeóstasis
Microbiota	(+)	(+)	(+)	Sinergia
Biodiversidad	(+)	(+)	(+)	Sinergia
Eficiencia de la fertilización	(+)	(+)	(+)	Homeóstasis
Capacidad de intercambio catiónico	(+)	(0)	(0)	Homeóstasis
Saturación de nutrientes	(-)	(-)	(-)	Entropía
Nutrientes del suelo	(+)	(+)	(+)	Homeóstasis
Materia orgánica	(+)	(+)	(+)	Sinergia
Retención de agua	(+)	(+)	(+)	Homeóstasis
Humedad	(+)	(+)	(0)	Homeóstasis
Sequía	(-)	(-)	(-)	Entropía
Temperatura	(-)	(-)	(0)	Entropía
Encharcamiento	(-)	(-)	(-)	Entropía
Eficiencia del drenaje	(+)	(+)	(0)	Homeóstasis
Textura del suelo	(+)	(+)	(0)	Estructura

Nota: (+) = Fortalece, (-) Debilita, (0) = Neutro. Columnas: 1. Salud del suelo, 2. Producción de maíz, 3. Seguridad alimentaria, 4. Propiedad sistémica.

Los factores que debilitan la salud del suelo tienen el mismo impacto tanto en la producción de maíz como en la seguridad alimentaria. La homeóstasis como factor autorregulador está muy presente en los suelos como sistemas vivos, desde la acción natural del ciclo de nutrientes la acción de los microorganismos que consumen desechos y producen materia orgánica favorables siendo más resiliente al estrés. Seguido de la entropía como Tendencia a degradar, desde la pérdida de fertilidad, erosión, compactación por el uso de agroquímicos y monocultivos. Seguida de la sinergia que permite la interacción o vínculo microorganismos, materia orgánica, minerales haciendo al suelo más fértil.

El modelo causal para representar los vínculos o polaridades entre la calidad del suelo y la seguridad alimentaria se representa en la Figura 2. En el que la salud

del suelo influye en la disponibilidad de agua, aire y nutrientes para el desarrollo de las plantas.

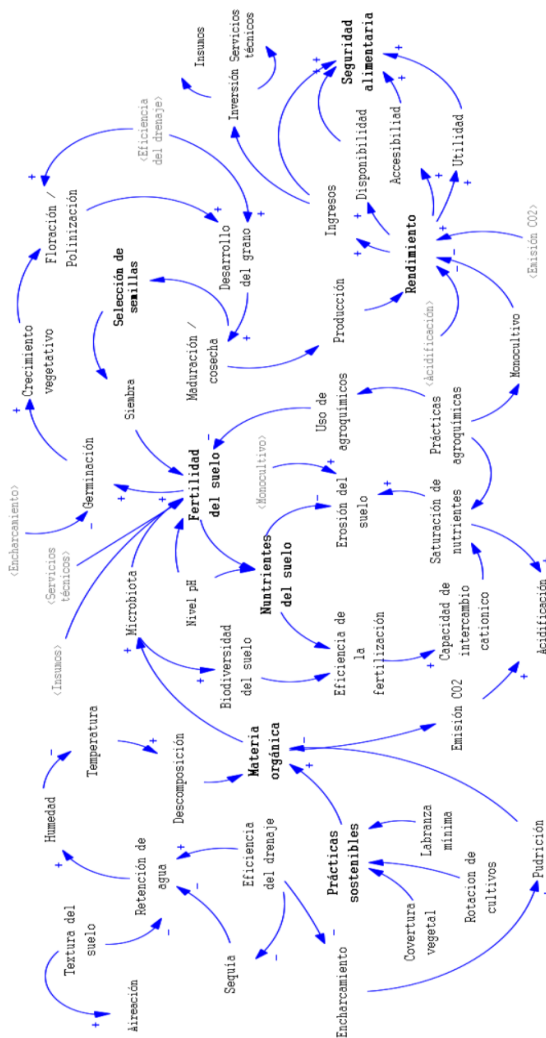


Figura 2. Mapa causal relación: Suelo -Producción de maíz - Seguridad alimentaria

Los suelos como sistemas organizados permiten observar distintas propiedades sistémicas como cuando Zanella *et al.* [1] los describe como sistemas que albergan micro y subsistemas, pero a su vez el suelo hace parte de un sistema más amplio esto resalta la propiedad de recursividad de los sistemas, y su función de homeostasis cuando adapta su funcionamiento a las condiciones del entorno por lo cual está en constante cambio, y además responde a las necesidades de los organismos que en el habitan. Los suelos hospedan gran diversidad biológica y microbiológica como una red alimentaria, la cual es muy compleja y en ella se desarrollan funciones vitales de los ecosistemas y es lo que fortalece la biodiversidad de la superficie mediante los procesos de retroalimentación entre las plantas y el suelo. Pero este proceso se ve afectado por la degradación producto de las malas prácticas conllevando a un sistema acidificado y compacto haciéndolo poco productivo, lo

cual da muestra su entropía, poniendo en riesgo la producción de alimentos y por ende la seguridad alimentaria [2,7].

Aunque el suelo se considera principalmente por su papel en el apoyo a la productividad primaria, distintas políticas apuntan a la protección de estos por su papel frente a la contaminación del agua por nitratos agrícolas y el cambio climático [31]. Pese a su importancia la biodiversidad del suelo ha sido en gran medida ignorada [2], a pesar de la importancia de los organismos del suelo (bacterias, hongos, artrópodos, invertebrados, etc.), como principales reguladores de las funciones y servicios esenciales de los ecosistemas, como la productividad de las plantas, el ciclo de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica y la degradación de contaminantes, poco se comprenden los cambios en la biodiversidad del suelo, y es un asunto relevante que promueve un mejor conocimiento y una capacidad más precisa para estimar políticas más acertadas para su protección y efectos en la producción alimentaria [13].

La productividad primaria se ve afectada entre otros factores, pero en gran medida por la deficiencia del uso del nitrógeno, produciendo un continuo deterioro de la calidad del suelo obstaculizando la seguridad alimentaria y la productividad agrícola en varios países en desarrollo [4]. Por lo cual es menester el desarrollo de estrategias de gestión agrícola sostenibles para equilibrar la producción de alimentos, la salud del suelo y los impactos ambientales [24]. En la Figura 3 se presenta un decálogo de mejores prácticas del suelo agrícola para una producción sostenible como estrategia de mitigación ante el deterioro de los suelos agrícolas.

Rotación y asociación de cultivo
Labranza cero o mínima
Cultivo de cobertura
Fertilización en cantidad que requiera el suelo y cultivo
Uso racional de agroquímicos
Plantación de leguminosas
Reincorporación de desperdicios
Promoción de la biodiversidad del suelo
Monitoreo y análisis de suelo
Construcción de barreras vivas para evitar la infertilidad

Figura 3. Decálogo de las mejores prácticas del suelo agrícola.

Como Trabajo futuro se propone la cuantificación de la pérdida de suelo en terrenos con producción intensiva de maíz y evaluar métodos para mitigación considerando el uso de biofertilizantes y manejo biológico para mejorar la fertilidad del suelo y rendimiento del maíz.

IV. CONCLUSIONES

El suelo es fuente de vida y lo que en él se produce es necesario para que esa vida se conserve [7], de allí la importancia de preservar su salud; en este crecen las plantas que producen los alimentos para la dieta humana y animal, además

de ser utilizados como materias primas en otros procesos industriales, algunos enfocados en la alimentación otros no. Pese a su importancia la biodiversidad del suelo ha sido en gran medida ignorada como se señala en Duarte *et al.* [2]. La salud o calidad del suelo le permitirá responder a las necesidades de los cultivos de acuerdo con los límites del ecosistema, un suelo sano contribuye a la disminución de patógenos y plagas, distribuye los nutrientes necesarios evitando el uso de químicos externos que alteran el ambiente interno y externo del suelo como sistema vivo.

La elección de un enfoque sistémico permite analizar el suelo no solo como un sustrato físico, sino como un sistema dinámico en el que interactúan factores biológicos, químicos y físicos. Esta perspectiva metodológica tiene las siguientes implicaciones: 1) Se reconoce la influencia de la estructura del suelo en la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la retención de agua. 2) Se consideran propiedades sistémicas como la sinergia, la homeostasis, y la entropía, que permitan analizar las variables que afectan y pueden ayudar a mejorar la salud del suelo. Por último, en este estudio 3) Se identifican estrategias para mejorar el suelo mediante prácticas de manejo sostenible resumidos en un decálogo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el SEHCYTI a través de la beca nacional de estudios de posgrado 2024-1 y la Beca de Estímulo Institucional a la Formación de Investigadores (BEIFI) del Programa Institucional de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional. Reconocimiento especial al programa de posgrado en Ingeniería de Sistemas por abrir estos espacios para el intercambio de conocimientos.

REFERENCIAS

- [1] Zanella A, Ascher-Jenull J, Ponge J-F *et al.* Humusica - Soil biodiversity and global change. *Bulletin of Geography Physical Geography Series*. No. 14, pp 15-36, 2018. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2018-0002>
- [2] Duarte AC, Guerra CA, Cano-Díaz C *et al.* Effects of protected areas on soil nematode communities in forests of the North of Portugal. *Biodivers Conserv* Vol. 33, No. 1, pp 73-89, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02732-6>
- [3] Li Z, Zhang J. Effects of Raised Ambient Temperature on the Local and Systemic Adaptions of Maize. *Plants*. Vol. 11, No. 6, pp 755, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11060755>
- [4] Sarfraz R, Shakoor A, Abdullah M *et al.* Impact of integrated application of biochar and nitrogen fertilizers on maize growth and nitrogen recovery in alkaline calcareous soil. *Soil Science and Plant Nutrition*. Vol. 63, No. 5, pp 488-498, 2017. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1376225>
- [5] Spangenberg JH, Beaurepaire AL, Bergmeier E *et al.* The LEGATO cross-disciplinary integrated ecosystem service research framework: an example of integrating research results from the analysis of global change impacts and the social, cultural and economic system dynamics of irrigated rice production. *Paddy Water Environ*. Vol. 16, No. 2, pp 287-319, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10333-017-0628-5>

- [6] Ran Q, Zhang S, Arif M *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on carbon assimilation and ecological stoichiometry of maize under combined abiotic stresses. *Journal of Plant Ecology*. Vol. 17, No. 2, pp rtae010, 2024. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtae010>
- [7] Vanermen I, Muys B, Verheyen K *et al.* What do scientists and managers know about soil biodiversity? Comparative knowledge mapping for sustainable forest management. *Forest Policy and Economics*. Vol. 119, pp 102-264, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102264>
- [8] Farina MPW, Channon P, Thibaud GR *et al.* Soil and plant potassium optima for maize on a kaolinitic clay soil. *South African Journal of Plant and Soil*. Vol. 9, No. 4, pp 193-200, 1992. <https://doi.org/10.1080/02571862.1992.10634628>
- [9] Wang X, Feng J, White PJ *et al.* Heterogeneous phosphate supply influences maize lateral root proliferation by regulating auxin redistribution. *Annals of Botany*. Vol. 125, No. 1, pp 119-130, 2020. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz154>
- [10] Reinhardt CF, Nel PC. The influence of phosphorus on the tolerance of maize (*Zea mays* L.) to atrazine. *South African Journal of Plant and Soil*. Vol. 9, No. 4, pp 201-205, 1992. <https://doi.org/10.1080/02571862.1992.10634629>
- [11] Yu B, Zhou C, Wang Z *et al.* Maize zinc uptake is influenced by arbuscular mycorrhizal symbiosis under various soil phosphorus availabilities. *New Phytologist*. Vol. 243, No. 5, pp 1936-1950, 2024. <https://doi.org/10.1111/nph.19952>
- [12] Liu Y, Li SQ, Yang SJ *et al.* Diurnal and seasonal soil CO₂ flux patterns in spring maize fields on the Loess Plateau, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. Vol. 60, No. 3, pp 245-255, 2010. <https://doi.org/10.1080/09064710902878121>
- [13] Mo L, Zanella A, Bolzonella C *et al.* Land Use, Microorganisms, and Soil Organic Carbon: Putting the Pieces Together. *Diversity*. Vol. 14, No. 8, pp 638, 2022. <https://doi.org/10.3390/d14080638>
- [14] Chowdhury IA, Yan G, Friskop A. Occurrence of vermiform plant-parasitic nematodes in North Dakota corn fields and impact of environmental and soil factors. *Canadian Journal of Plant Pathology*. Vol. 42, No. 3, pp 429-444, 2020. <https://doi.org/10.1080/07060661.2019.1674384>
- [15] Masiello M, Somma S, Lo Porto C *et al.* Plasma Technology Increases the Efficacy of Prothioconazole against *Fusarium graminearum* and *Fusarium proliferatum* Contamination of Maize (*Zea mays*) Seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*. Vol. 22, No. 17, pp 9301, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22179301>
- [16] Oviatt P, Rillig MC. Mycorrhizal technologies for an agriculture of the middle. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*. Vol. 3, No. 5, pp 454-461, 2021. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10177>
- [17] Sas Paszt L, Smolińska U, Trzciniński P *et al.* Effect of microbiologically enriched fertilizers on soil microorganisms in the rhizosphere of apple trees. *Horticultural Science*. Vol. 50, No. 3, pp 189-198, 2023. <https://doi.org/10.17221/97/2021-HORTSCI>
- [18] Basamba TA, Amézquita E, Singh BR *et al.* Effects of tillage systems on soil physical properties, root distribution and maize yield on a Colombian acid-savanna Oxisol. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. Vol. 54, No. 4, pp 255-262, 2006. <https://doi.org/10.1080/09064710500297690>
- [19] Kulagowski R, Thoumazeau A, Leopold A *et al.* Effects of conservation agriculture maize-based cropping systems on soil health and crop performance in New Caledonia. *Soil and Tillage Research*. Vol. 212, pp 105079, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105079>
- [20] Mendes AP, Farina MPW, Channon P *et al.* A field evaluation of the differential tolerance to soil acidity of forty-eight South African maize cultivars. *South African Journal of Plant and Soil*. Vol. 2, No. 4, pp 215-220, 1985. <https://doi.org/10.1080/02571862.1985.10634173>
- [21] Magaia E, Arvidsson J, Brito R *et al.* Maize root development and grain production as affected by soil and water management on a sandy soil in a semi-arid region of southern Mozambique. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. Vol. 66, No. 3, pp 247-258, 2016. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1090624>
- [22] Berry WAJ, Mallett JB. The effect of removing maize surface residue from the seed-row on seedzone temperature, soil water and maize development. *South African Journal of Plant and Soil*. Vol. 6, No. 2, pp 108-112, 1989. <https://doi.org/10.1080/02571862.1989.10634492>
- [23] Kaminskyi V, Bulgakov V, Tkachenko M *et al.* Research into Comparative Performance of Different Tillage and Fertilization Systems Applied to Grey Forest Soil of Forest Steppe in Grain Crop Rotation. Vol. 23, No. 12, pp 163-178, 2022. <https://doi.org/10.12911/22998993/155057>
- [24] Rahman MS, Ferdous J, Mumu NJ *et al.* Crop residues integration with nitrogen rates reduces yield-scaled nitrous oxide emissions and improves maize yield and soil quality. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. Vol. 21, No. 1, pp 2310856, 2024. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2024.2310856>
- [25] Grzesiak MT, Hura K, Jurczyk B *et al.* Physiological markers of stress susceptibility in maize and triticale under different soil compactions and/or soil water contents. *Journal of Plant Interactions*. Vol. 12, No. 1, pp 355-372, 2017. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1370143>
- [26] Zia R, Nawaz MS, Siddique MJ *et al.* Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*. Vol. 242, pp 126626 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>
- [27] Sterman John. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, 2000:982.
- [28] Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. Vol. 104, pp 333-339, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- [29] Crabolu G, Font X, Eker S. Evaluating policy complexity with Causal Loop Diagrams. *Annals of Tourism Research*. Vol. 100, pp 103572, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2023.103572>
- [30] Haraldsson H. *Introduction to system thinking and causal loop diagrams*. Environmental Engineering Group. Lund, Sweden: Department of Chemical Engineering, Lund University, 2004.
- [31] Zwetsloot MJ, van Leeuwen J, Hemerik L *et al.* Soil multifunctionality: Synergies and trade-offs across European climatic zones and land uses. *European Journal of Soil Science*. Vol. 72, No. 4, pp 1640-1654, 2021. <https://doi.org/10.1111/ejss.13051>