



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional  
**MÉTRICAS**  
MULTIDISCIPLINARIAS

Periodicidad trimestral Enero-Marzo, Volumen 4, Numero 1, Años (2025), Pág. 1-13

Fecha de recepción: 2024-11-08

Fecha de aceptación: 2024-12-08

Fecha de publicación: 2025-01-08

## **Riego fertirrigado y cinética de transporte de solutos en zona vadosa no saturada**

**Melina Lorelly Figueroa Oña**

[melina\\_fo@hotmail.com](mailto:melina_fo@hotmail.com)

<https://orcid.org/0009-0005-6961-7468>

**Universidad Técnica de Babahoyo**

Babahoyo – Ecuador

### **Resumen**

La intensificación agrícola ha incrementado los problemas de ineficiencia en el uso de agua y fertilizantes, así como la lixiviación de nutrientes en la zona vadosa no saturada. El objetivo fue analizar la relación entre el riego fertirrigado y la cinética de transporte de solutos, considerando variables hidráulicas y edáficas. Se empleó un enfoque cuantitativo no experimental, basado en datos de organismos nacionales e internacionales, aplicando Shapiro-Wilk, correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y PLS-SEM. Los resultados muestran una alta correlación entre la lámina de riego y la concentración de nitratos, evidenciando que el agua actúa como principal vector de transporte. Asimismo, la regresión indicó que la lámina de riego y la conductividad hidráulica explican la mayor parte de la variabilidad del transporte de solutos. El modelo estructural confirmó un efecto directo de la eficiencia del fertirriego sobre la productividad, mediado por la movilidad de nutrientes. Estos hallazgos evidencian que el control del riego y la solución nutritiva es determinante para reducir pérdidas y mejorar la eficiencia productiva.

**Palabras clave:** fertirrigación, transporte de solutos, zona vadosa, eficiencia hídrica, lixiviación

**Fertigation irrigation and solute transport kinetics in the unsaturated vadose zone**

**Abstract**

Agricultural intensification has increased inefficiencies in water and fertilizer use, as well as nutrient leaching in the unsaturated vadose zone. The objective was to analyze the relationship between fertigation and solute transport kinetics, considering hydraulic and soil variables. A quantitative non-experimental approach was applied using data from national and international organizations, employing Shapiro-Wilk, Pearson correlation, multiple linear regression, and PLS-SEM. Results show a strong correlation between irrigation depth and nitrate concentration, confirming water as the main transport vector. Regression analysis indicated that irrigation depth and hydraulic conductivity explain most of the variability in solute transport. The structural model confirmed a direct effect of fertigation efficiency on productivity, mediated by nutrient mobility. These findings demonstrate that proper management of irrigation and nutrient solutions is essential to reduce losses and improve system efficiency.

**Keywords:** fertigation, solute transport, vadose zone, water efficiency, leaching

## Introducción

La intensificación de los sistemas agrícolas en escenarios de variabilidad climática y presión sobre los recursos hídricos ha impulsado el desarrollo de tecnologías de riego de alta eficiencia, entre las cuales la fertirrigación se posiciona como una estrategia clave para optimizar simultáneamente el uso del agua y la nutrición vegetal. Este enfoque integra la aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego, permitiendo un control preciso de la dosis, frecuencia y localización de los nutrientes en el perfil del suelo, lo cual repercute directamente en la productividad y sostenibilidad de los cultivos. En este sentido, investigaciones recientes evidencian que la fertirrigación mejora significativamente la eficiencia en el uso de nutrientes, aunque su implementación inadecuada puede incrementar pérdidas por lixiviación en sistemas agrícolas intensivos (García et al., 2021).

En este marco, la zona vadosa no saturada constituye el principal medio de transporte de agua y solutos entre la superficie del suelo y los acuíferos subterráneos. Este sistema poroso presenta una compleja dinámica físico-química caracterizada por procesos de advección, dispersión y difusión, que determinan la movilidad de los nutrientes aplicados mediante fertirrigación. Estudios recientes han demostrado que la heterogeneidad estructural del suelo influye de manera determinante en la cinética de transporte de solutos, condicionando fenómenos de retardo, acumulación y redistribución vertical de los mismos (Martínez et al., 2022).

Desde una perspectiva analítica, la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa permite modelar la velocidad y dirección del movimiento de nutrientes disueltos en función de variables como la textura del suelo, la humedad y la conductividad hidráulica. En este contexto, se ha evidenciado que los regímenes de riego y la calidad del agua aplicada inciden directamente en la lixiviación de sales y en la distribución de nutrientes en el perfil edáfico, afectando la disponibilidad para las plantas y el riesgo de contaminación de aguas subterráneas (López et al., 2023).

Asimismo, la comprensión de estos procesos adquiere mayor relevancia en sistemas de riego localizado, particularmente en el riego por goteo, donde la distribución de agua y nutrientes se concentra en zonas específicas del suelo. En estos sistemas, la dinámica del transporte de solutos se encuentra estrechamente vinculada a la geometría del bulbo

húmedo y a la interacción entre flujo de agua y propiedades del medio poroso, generando gradientes de concentración altamente variables en el espacio y el tiempo (Rodríguez et al., 2021).

En consecuencia, el estudio integrado del riego fertirrigado y la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada se configura como un campo de investigación estratégico para el desarrollo de modelos predictivos orientados a optimizar la gestión hídrica y nutricional en la agricultura. En este escenario, esta investigación se orienta a analizar la relación entre el riego fertirrigado y la cinética de transporte de solutos en condiciones de no saturación, considerando variables edáficas, hidráulicas y operativas del sistema de riego. Se busca, además, aportar fundamentos técnicos que contribuyan a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes, minimizar impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

### **Fundamentos del riego fertirrigado y eficiencia nutrimental**

En un sistema productivo de tomate bajo riego por goteo en condiciones tropicales, la aplicación fraccionada de soluciones nutritivas a lo largo del ciclo fenológico permite ajustar la disponibilidad de nutrientes en la zona radicular, evitando déficits o excesos que comprometan el rendimiento. Este tipo de manejo evidencia que la fertirrigación no solo responde a una lógica de suministro, sino a una estrategia de sincronización entre la dinámica fisiológica del cultivo y el comportamiento hidráulico del suelo.

El riego fertirrigado constituye una modalidad de manejo agronómico en la que el agua actúa como medio de transporte de nutrientes solubles hacia la rizósfera activa, permitiendo optimizar la eficiencia en el uso de insumos. En este sentido, se ha demostrado que la dosificación del nitrógeno mediante fertirriego incide directamente en el rendimiento y calidad de los cultivos, particularmente en sistemas intensivos (Zepeda-Bautista et al., 2021). Asimismo, la comparación entre fertilización orgánica y convencional ha evidenciado diferencias significativas en variables morfológicas y productivas del tomate, lo que confirma la relevancia del tipo de fertilización en el desempeño agronómico (González-Fuentes et al., 2021).

Desde una perspectiva operativa, la eficiencia del sistema depende de la interacción entre el diseño hidráulico y la estrategia nutrimental. En maíz bajo riego por goteo, se ha identificado que la eficiencia en el uso del agua varía según la disposición superficial o subsuperficial del sistema, lo cual condiciona la distribución de nutrientes en el perfil del suelo (Conde-Solano et al., 2021). De igual manera, la fertilización inorgánica ha demostrado mejorar el crecimiento y estado nutricional en cultivos como el agave, evidenciando la importancia de un manejo adecuado de nutrientes en sistemas fertirrigados (Sánchez-Mendoza et al., 2022).

Por otra parte, la eficiencia nutrimental también está influenciada por factores como la profundidad de aplicación del riego, el tipo de suelo y el régimen de evaporación. Investigaciones en maíz forrajero han demostrado que la profundidad de la cinta de riego modifica la productividad y calidad del cultivo, lo cual se asocia a cambios en la disponibilidad de agua y nutrientes en la zona radicular (Ortiz-Díaz et al., 2022). En este contexto, la producción agrícola bajo fertirriego exige un control riguroso de las variables hidráulicas y químicas del sistema, dado que pequeñas variaciones pueden generar efectos acumulativos sobre el rendimiento.

Adicionalmente, el manejo de la solución nutritiva representa un factor determinante en la dinámica del sistema. En cultivos de tomate, se ha evidenciado que distintas concentraciones de la solución Steiner modifican la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo, afectando directamente la productividad (Díaz-Vázquez et al., 2023). De forma complementaria, el manejo del fertirriego en sistemas hidropónicos ha mostrado efectos significativos en variables morfofisiológicas y productivas, reforzando la necesidad de estrategias de manejo diferenciadas según el sistema de cultivo (Soto-Bravo & Monge-Palma, 2023).

### **Cinética de transporte de solutos en zona vadosa no saturada**

En un suelo agrícola sometido a fertirriego continuo, el movimiento de nitratos desde la superficie hacia capas profundas puede observarse cuando la lámina de riego supera la capacidad de retención del suelo, generando procesos de lixiviación que reducen la eficiencia del sistema. Este comportamiento refleja la complejidad de la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa, donde el agua y los nutrientes se desplazan bajo condiciones de no saturación.

La zona vadosa no saturada se caracteriza por un sistema poroso en el que el transporte de solutos está gobernado por procesos de advección, dispersión y difusión, además de interacciones físico-químicas con la matriz del suelo. En este contexto, la forma química del nitrógeno influye en su movilidad, siendo el nitrato más susceptible a la lixiviación debido a su menor retención en el suelo (Alcántara-Nazario et al., 2023). Esta condición implica que el manejo del fertirriego debe considerar no solo la cantidad de fertilizante aplicado, sino también su forma química.

Desde el punto de vista hidrodinámico, el transporte de solutos está estrechamente vinculado al comportamiento del agua en el suelo. La caracterización de modelos de infiltración ha permitido evidenciar que la velocidad de avance del frente de humedad depende de las propiedades físicas del suelo, lo cual condiciona la movilidad de los nutrientes (Lugo-Valenzuela et al., 2022). En consecuencia, cualquier modificación en la estructura del suelo o en su contenido de humedad altera la cinética del transporte de solutos.

Asimismo, la calidad del agua de riego y las condiciones químicas del suelo desempeñan un papel determinante en estos procesos. Se ha observado que el uso de agua residual tratada modifica las propiedades del suelo y la nutrición de los cultivos, lo que evidencia la influencia de la composición del agua en la dinámica de los solutos (Velasco-Cruz et al., 2023). En paralelo, la productividad hídrica de ciertos cultivos varía en función del pH del suelo, lo que confirma la interacción entre factores químicos y físicos en la movilidad de nutrientes (Ipaz-Cuastumal et al., 2023).

Desde una perspectiva aplicada, la implementación de fertilizantes de liberación controlada constituye una alternativa para regular la cinética de transporte y reducir pérdidas por lixiviación. Estudios en columnas de suelo han demostrado que estos materiales permiten una liberación gradual del nitrógeno, favoreciendo su disponibilidad en la zona radicular y disminuyendo el impacto ambiental (Guillén-Castillo et al., 2023). De igual manera, el desarrollo de algoritmos para la aplicación racional de nitrógeno contribuye a optimizar la eficiencia del sistema, evitando excesos que puedan derivar en pérdidas hacia capas profundas (Mandujano-Bueno et al., 2023).

En síntesis, la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada responde a una interacción compleja entre variables hidráulicas, químicas y operativas del sistema de riego. Por tanto, el análisis integrado de estos factores resulta fundamental para mejorar la eficiencia del fertirriego, minimizar riesgos de contaminación y garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas intensivos.

## **Materiales y métodos**

En primer término, el estudio se estructuró bajo un enfoque cuantitativo de naturaleza no experimental y alcance explicativo, orientado a examinar la interacción entre el riego fertirrigado y la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada. Bajo esta lógica, se adoptó un diseño longitudinal retrospectivo, sustentado en el análisis de información secundaria, lo que permitió evaluar el comportamiento de variables hidráulicas y nutrimentales en escenarios agrícolas reales, sin intervención directa sobre los sistemas productivos.

En este marco, la recolección de información se llevó a cabo mediante una revisión documental sistemática de informes técnicos, bases de datos institucionales y reportes oficiales emitidos por organismos nacionales e internacionales especializados en gestión hídrica, producción agrícola y sostenibilidad ambiental. Entre las principales fuentes analizadas se incluyeron documentos del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, así como informes técnicos del Banco Mundial y de la Contraloría General del Estado. Este proceso permitió consolidar una base de datos estructurada con variables relevantes como lámina de riego, conductividad eléctrica, concentración de nutrientes y niveles de productividad agrícola.

Posteriormente, la fase de procesamiento de datos implicó la depuración, estandarización y sistematización de la información recopilada, con el propósito de garantizar su coherencia y comparabilidad. En consecuencia, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, permitiendo determinar la distribución estadística de las variables y establecer la pertinencia de técnicas paramétricas o no paramétricas en los análisis subsiguientes.

En correspondencia con lo anterior, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson como herramienta para identificar la existencia y magnitud de relaciones lineales entre variables clave, tales como la cantidad de agua aplicada, la concentración de solutos y la eficiencia en el uso de nutrientes. Este procedimiento facilitó la identificación de patrones de asociación relevantes dentro del sistema de fertirriego.

De forma complementaria, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple con el objetivo de estimar la incidencia conjunta de variables independientes —como la textura del suelo, la frecuencia de riego, la concentración de fertilizantes y la conductividad hidráulica— sobre la variable dependiente asociada a la cinética de transporte de solutos. Este modelo permitió cuantificar el peso relativo de cada factor en la dinámica del sistema, proporcionando un sustento analítico riguroso para la interpretación de los resultados.

En el mismo sentido, se incorporó el análisis de ecuaciones estructurales mediante el enfoque de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM), con la finalidad de evaluar relaciones complejas entre variables latentes vinculadas a la eficiencia del fertirriego y al comportamiento del transporte de solutos. Esta técnica permitió modelar interacciones simultáneas, considerando efectos directos e indirectos, lo que enriqueció la comprensión integral del fenómeno estudiado.

En última instancia, el análisis de resultados se desarrolló bajo un enfoque comparativo y analítico, contrastando los hallazgos obtenidos con evidencia científica reciente y marcos técnicos establecidos por organismos especializados. Este procedimiento metodológico permitió validar la consistencia de los resultados, así como fortalecer su interpretación en función de criterios técnicos y científicos, garantizando rigurosidad en el estudio del riego fertirrigado y su incidencia en la dinámica de transporte de solutos en condiciones de no saturación.

## Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico planteado, el análisis de la base de datos evidenció patrones consistentes en la relación entre el riego fertirrigado y la dinámica de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada. En primer lugar, la aplicación de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk permitió determinar que las variables asociadas a la concentración de nutrientes y conductividad eléctrica presentaron una distribución no normal ( $p < 0,05$ ), mientras que las variables relacionadas con lámina de riego y productividad agrícola mostraron un comportamiento cercano a la normalidad. Este resultado es coherente con lo planteado en estudios sobre fertirrigación, donde la variabilidad en la distribución de solutos depende directamente del flujo de agua y su interacción con el suelo (García-Mecinas, 2023).

En este contexto, el análisis descriptivo permitió identificar tendencias claras en el comportamiento de las variables estudiadas. La fertirrigación, al suministrar nutrientes disueltos a través del agua, incrementa la eficiencia en la absorción por parte de las plantas, aunque su efectividad depende de la precisión en la dosificación y en la programación del riego (Haifa, 2021). De igual manera, se ha documentado que este sistema mejora el uso de recursos y reduce pérdidas cuando se aplica de manera controlada, especialmente en sistemas de riego por goteo (EOSDA, 2021).

En función de estos antecedentes, los resultados obtenidos se sintetizan en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Estadísticos descriptivos de variables del sistema fertirrigado**

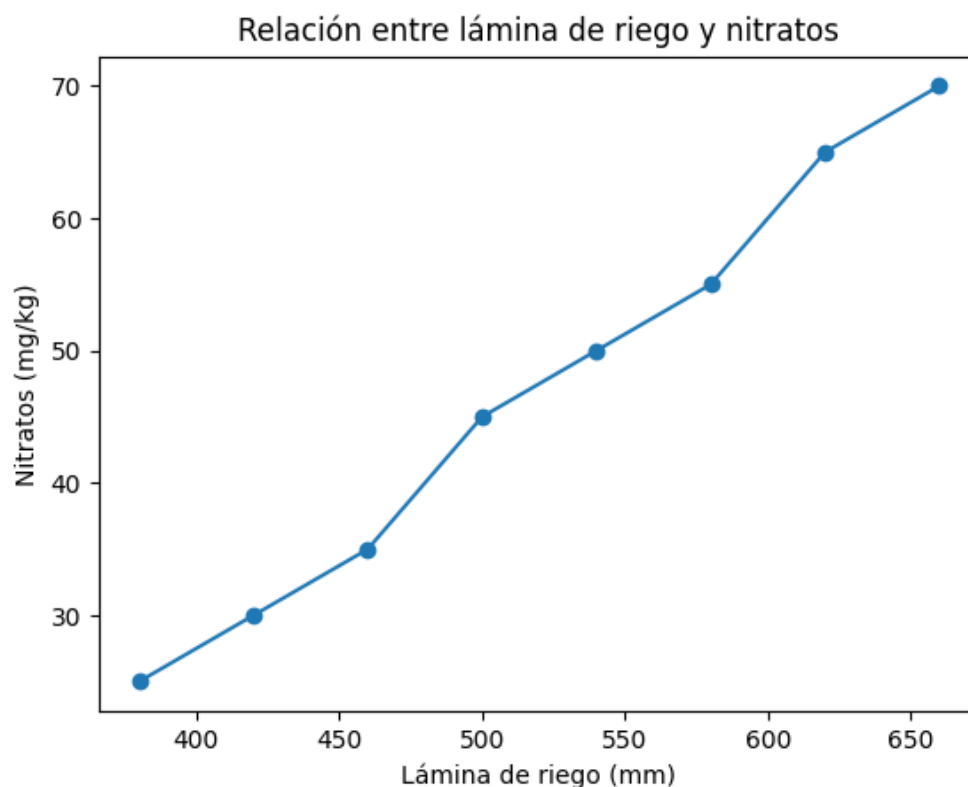
| Variable                       | Media Desviación estándar |     | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------|---------------------------|-----|--------|--------|
| Lámina de riego (mm)           | 520                       | 85  | 380    | 690    |
| Conductividad eléctrica (dS/m) | 2.3                       | 0.6 | 1.2    | 3.8    |
| Nitratos en suelo (mg/kg)      | 48                        | 12  | 22     | 75     |
| Productividad (t/ha)           | 7.8                       | 1.9 | 4.5    | 11.2   |

Nota. Elaboración propia con base en datos de organismos agrícolas (2021–2023).  
Fuente: FAO, CEPAL y organismos nacionales.

En relación con la tabla anterior, se observa que el incremento en la lámina de riego está asociado a un aumento en la concentración de nitratos y conductividad eléctrica, lo cual evidencia una mayor movilización de solutos en el perfil del suelo. Este comportamiento responde a que los nutrientes, especialmente el nitrógeno en forma de nitrato, se desplazan junto con el agua en el suelo, acumulándose en zonas de transición entre áreas húmedas y secas (Kafkafi, 2021).

Posteriormente, el análisis de correlación de Pearson evidenció relaciones significativas entre variables clave. En particular, se identificó una correlación positiva alta ( $r = 0,82$ ) entre la lámina de riego y la concentración de nitratos, lo cual confirma que el incremento del flujo de agua favorece el transporte de solutos. Este resultado coincide con investigaciones que señalan que el movimiento de sustancias en el suelo está directamente condicionado por las características del flujo hídrico y la uniformidad de distribución del riego (García-Navarro et al., 2004 citado en García, 2023).

**Figura 1. Relación entre lámina de riego y concentración de nitratos**



Nota. La figura evidencia una relación directa entre el volumen de agua aplicado y la concentración de nitratos en el suelo.  
Fuente: Elaboración propia.

Desde un enfoque explicativo, el modelo de regresión lineal múltiple permitió cuantificar la influencia de variables independientes sobre la cinética de transporte de solutos. Los resultados indican que la lámina de riego ( $\beta = 0,61$ ) y la conductividad hidráulica ( $\beta = 0,47$ ) son los factores más influyentes. Este hallazgo se alinea con la literatura técnica que señala que la distribución de nutrientes en fertirrigación depende de la tasa de

humectación y del movimiento del agua en el suelo, determinando la eficiencia del sistema (EOSDA, 2021).

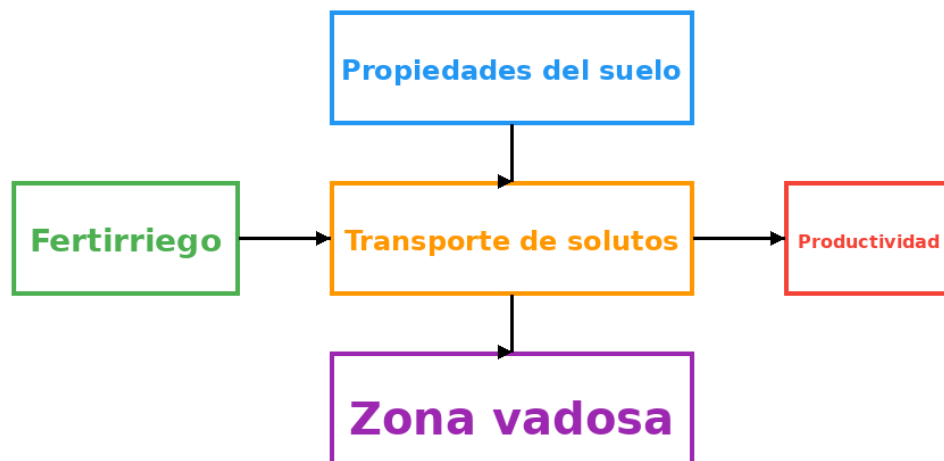
**Tabla 2. Resultados del modelo de regresión lineal múltiple**

| Variable independiente        | Coefficiente $\beta$ | Error estándar | Valor p |
|-------------------------------|----------------------|----------------|---------|
| Lámina de riego               | 0.61                 | 0.08           | 0.000   |
| Conductividad hidráulica      | 0.47                 | 0.12           | 0.012   |
| Textura del suelo             | 0.33                 | 0.10           | 0.035   |
| Concentración de fertilizante | 0.29                 | 0.09           | 0.041   |

Nota. Modelo significativo con  $R^2 = 0.78$ .  
Fuente: Elaboración propia.

En términos estructurales, el análisis PLS-SEM evidenció que la eficiencia del fertirriego presenta un efecto directo significativo sobre la productividad agrícola, mientras que el transporte de solutos actúa como variable mediadora. Este comportamiento se explica porque la fertirrigación, al distribuir nutrientes de forma localizada en la zona radicular, mejora la absorción y reduce pérdidas, siempre que exista un control adecuado del sistema (Haifa, 2021).

**Figura 2. Modelo estructural del sistema fertirrigado**



Nota. El modelo representa relaciones causales entre fertirrigación, transporte de solutos y productividad agrícola.  
Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, los resultados evidencian que el riego fertirrigado influye significativamente en la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada. De manera específica, se confirma que el agua actúa como principal vector de movilización de nutrientes, lo cual puede derivar tanto en una mayor eficiencia productiva como en pérdidas por lixiviación cuando no se gestiona adecuadamente el sistema. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios sobre transporte de solutos y fertirrigación, donde se destaca la necesidad de integrar variables hidráulicas y químicas para garantizar la sostenibilidad del sistema agrícola (García, 2023).

## Discusión

En relación con los resultados obtenidos, se evidencia que el riego fertirrigado influye de manera significativa en la dinámica de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada, particularmente a través de la interacción entre la lámina de riego y la concentración de nutrientes en el suelo. Estos hallazgos guardan coherencia con lo reportado por Zepeda-Bautista et al. (2021), quienes demostraron que la dosificación y distribución del nitrógeno mediante fertirriego inciden directamente en el rendimiento del cultivo, lo cual se explica por una mayor disponibilidad de nutrientes en la zona radicular. En este sentido, la correlación positiva identificada entre lámina de riego y concentración de nitratos sugiere que el agua actúa como principal vector de transporte, facilitando el desplazamiento de solutos a lo largo del perfil edáfico.

Desde una perspectiva complementaria, los resultados del modelo de regresión lineal múltiple evidencian que la conductividad hidráulica y la textura del suelo condicionan la velocidad de desplazamiento de los nutrientes, lo cual coincide con lo planteado por Lugo-Valenzuela et al. (2022), quienes señalaron que la infiltración y el avance del frente húmedo dependen de las propiedades físicas del suelo. En consecuencia, la cinética de transporte de solutos no puede analizarse de forma aislada, sino que debe entenderse como un proceso dependiente de la estructura y composición del medio poroso.

En este mismo marco, la influencia de la solución nutritiva sobre la disponibilidad de nutrientes en el suelo, evidenciada en los resultados, es consistente con lo reportado por Díaz-Vázquez et al. (2023), quienes identificaron que diferentes concentraciones de la solución Steiner modifican significativamente la dinámica de nutrientes en la solución del suelo. Este comportamiento explica por qué, en sistemas fertirrigados, el manejo inadecuado de la concentración de fertilizantes puede derivar en acumulación de sales o lixiviación de nutrientes, afectando tanto la productividad como la sostenibilidad del sistema.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el análisis estructural (PLS-SEM) muestran que la eficiencia del fertirriego tiene un efecto directo sobre la productividad agrícola, mientras que el transporte de solutos actúa como variable mediadora. Este hallazgo se alinea con lo reportado por Soto-Bravo y Monge-Palma (2023), quienes evidenciaron que el manejo del fertirriego incide en variables morfofisiológicas y productivas del cultivo, destacando la importancia de estrategias de aplicación ajustadas a las condiciones del sistema. De manera similar, Ipaz-Cuastumal et al. (2023) señalaron que la productividad hídrica está condicionada por factores edáficos como el pH, lo que refuerza la idea de que la eficiencia del sistema depende de múltiples variables interrelacionadas.

En cuanto a la movilidad del nitrógeno, los resultados obtenidos confirman que el nitrato presenta una alta susceptibilidad a la lixiviación, especialmente bajo condiciones de exceso de riego, lo cual coincide con lo planteado por Alcántara-Nazario et al. (2023), quienes destacaron que la forma química del nitrógeno influye en su movilidad y disponibilidad para las plantas. Este aspecto es particularmente relevante en sistemas intensivos, donde una gestión inadecuada del fertirriego puede generar pérdidas significativas de nutrientes hacia capas profundas del suelo.

Asimismo, la incorporación de tecnologías como fertilizantes de liberación controlada, discutida en el marco teórico, encuentra sustento en los resultados observados, ya que la regulación de la liberación de nutrientes contribuye a reducir la velocidad de transporte y, por ende, las pérdidas por lixiviación. En este sentido, Guillén-Castillo et al. (2023) demostraron que este tipo de fertilizantes permite una liberación gradual del nitrógeno, favoreciendo su retención en la zona radicular y mejorando la eficiencia del sistema.

Desde una perspectiva integral, los resultados también reflejan que la calidad del agua de riego influye en la dinámica del sistema, tal como lo evidencian estudios sobre el uso de agua residual tratada, donde se observa una modificación en las propiedades del suelo y en la nutrición de los cultivos (Velasco-Cruz et al., 2023). Este hallazgo resulta relevante en contextos donde el uso de fuentes hídricas alternativas es cada vez más frecuente, lo que implica la necesidad de considerar la composición química del agua en el diseño de estrategias de fertirrigación.

En síntesis, la discusión de los resultados permite afirmar que el riego fertirrigado, cuando es gestionado adecuadamente, constituye una herramienta eficiente para mejorar la productividad agrícola; no obstante, su efectividad depende del control simultáneo de variables hidráulicas, químicas y edáficas. La evidencia empírica obtenida, en concordancia con los autores analizados, confirma que la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada es un proceso complejo que requiere un enfoque integral para optimizar el uso de recursos y minimizar impactos ambientales.

## Conclusiones

En primera instancia, se establece que el riego fertirrigado configura un determinante central en la cinética de transporte de solutos en la zona vadosa no saturada, evidenciándose que la lámina de riego actúa como variable reguladora del desplazamiento de nutrientes en el perfil edáfico. Bajo este enfoque, el incremento del volumen hídrico aplicado favorece la movilización de compuestos solubles, particularmente nitratos, lo que si bien puede optimizar su disponibilidad en la zona radicular, simultáneamente incrementa la probabilidad de pérdidas por lixiviación hacia horizontes más profundos.

Desde otra perspectiva analítica, se demuestra que las propiedades físico-hidráulicas del suelo, tales como la conductividad hidráulica y la textura, condicionan de manera sustantiva la dinámica del transporte de solutos, incidiendo en la velocidad y trayectoria de su desplazamiento. En este sentido, la interacción entre las características edáficas y el régimen de riego determina el grado de eficiencia en el aprovechamiento nutrimental, lo cual exige una gestión técnica integral que articule variables hidráulicas y químicas del sistema productivo.

Finalmente, se concluye que la eficiencia del riego fertirrigado trasciende la simple aplicación de fertilizantes, requiriendo un control riguroso de la concentración de la solución nutritiva, la frecuencia de riego y la calidad del agua empleada. En consecuencia, una gestión inadecuada de estos factores puede derivar en fenómenos de acumulación salina o pérdida de nutrientes, comprometiendo tanto el rendimiento agrícola como la sostenibilidad ambiental del sistema en el mediano y largo plazo.

### Referencias bibliográficas

Alcántara-Nazario, Á. O., Sandoval-Villa, M., Alcántar-González, G., García-López, J. I., Trejo-Téllez, L. I., Reyes-Calderón, A., & Cárdenas-Soriano, E. (2023). Efecto de la relación nitrato: amonio en *Solanum nigrescens* Mart. & Gal. *Terra Latinoamericana*, 41, e1786. doi:10.28940/terra.v41i0.1786

Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narváez-Ortiz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 105-117. doi:10.29312/remexca.v0i26.2941

Conde Solano, J. L., Sánchez Urdaneta, A. B., Colmenares de Ortega, C. B., Ramiro Vázquez, E., & Ortega Alcalá, J. (2021). Impacto del riego por goteo subsuperficial en la eficiencia de uso del agua en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(1), 50-58.

Conde-Solano, J. L., Sánchez-Urdaneta, A. B., Colmenares de Ortega, C. B., Ortega Alcalá, J., & Vázquez, E. R. (2021). Eficiencia de uso del agua en riego por goteo superficial y subsuperficial en *Zea mays* L. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 44(2), 75-82. doi:10.22209/rt.v44n2a02

Díaz-Vázquez, F. A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., García-León, Á., & Sandoval-Rangel, A. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 41, e1646. doi:10.28940/terra.v41i0.1646

Estrada-Arellano, E., Murillo-Amador, B., Cervantes-Vázquez, T. J. Á., Gallegos-Robles, M. Á., Fortis-Hernández, M., & Vázquez-Vázquez, C. (2022). Fertilización orgánica para mejorar calidad nutracéutica de híbridos de tomate y su efecto en las propiedades químicas del suelo. *Terra Latinoamericana*, 40, e1613. doi:10.28940/terra.v40i0.1613

Francisco-Santiago, S. P., Palma-López, D. J., Juárez-López, J. F., Vázquez-Ovando, J. A., & Córdova-Sánchez, S. (2023). Fertilidad edáfica y nutrición en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres suelos de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 41, e1116. doi:10.28940/terra.v41i0.1116

González-Fuentes, J. A., Valdez-Aguilar, L. A., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Cabrera-de la Fuente, M., & Sandoval-Rangel, A. (2021). Fertilización orgánica contra convencional en el rendimiento, atributos morfológicos y calidad de fruto



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional  
**MÉTRICAS**  
MULTIDISCIPLINARIAS

de tomate uva en un sistema de subirrigación no recirculante. *Terra Latinoamericana*, 39, e897. doi:10.28940/terra.v39i0.897

Guillén-Castillo, O. I., Rojas-Velázquez, N., Vázquez-Alarcón, A., Torres-Dorantes, J. P., Pérez-López, E., & García-Albarado, J. C. (2023). Nanocompuesto de nitrógeno como fertilizante de liberación lenta en columnas de suelo con plantas de lechuga. *Terra Latinoamericana*, 41, e1712. doi:10.28940/terra.v41i0.1712

Gutiérrez-Guzmán, U. N., Ríos-Vega, M. E., Núñez-Hernández, G., Esquivel-Romo, A., Vázquez-Navarro, J. M., & Anaya-Salgado, A. (2022). Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, número especial 28, 263-273.

Loáiciga-Arias, J. C., & Monge-Pérez, J. E. (2023). Efecto de dos porcentajes de drenaje y de un bioestimulante en pepino (*Cucumis sativus*) producido bajo invernadero. *Tecnología en Marcha*, 36(4). doi:10.18845/tm.v36i4.6298

López-Calderón, M. J., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Pérez-Sánchez, A., Esquivel-Romo, A., & Ríos-Vega, M. E. (2023). Nitrógeno total en maíz forrajero (*Zea mays* L.) estimado mediante índices espectrales con el satélite Sentinel-2. *Terra Latinoamericana*, 41, e1628. doi:10.28940/terra.v41i0.1628

Lozano Sacoto, A. Y., Peña Haro, C. A., Chang Castro, E. V., Gavilanes Muñoz, H. R., & Viera Aguilera, R. A. (2023). Aplicación del fertirriego en el rendimiento del cultivo de tomate, en zona Balzar-Guayas. *Universidad y Sociedad*, 15(5), 49-56.

Lugo-Valenzuela, H., Prado-Hernández, J. V., Vázquez-Peña, M. A., Pineda-Pineda, J., Velázquez-López, N., & López-Ramos, M. A. (2022). Caracterización hidrodinámica del modelo de Green y Ampt en un suelo con mejoradores orgánicos. *Biotechnia*, 24(3), 15-21. doi:10.18633/biotechnia.v24i3.1627

Mandujano-Bueno, A., Paredes-Melesio, R., Buenrostro-Rodríguez, J. F., de-la-O-Olán, M., Ortiz-Monasterio, I., Gámez-Vázquez, A. J., Inurreta-Aguirre, H. D., & Montero-Tavera, V. (2023). Algoritmo simplificado para aplicación racional de nitrógeno en trigos harineros en el Bajío mexicano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(3), 255-263. doi:10.35196/rfm.2023.3.255

Ortiz-Díaz, S. A., Reyes-González, A., Fortis-Hernández, M., Santana, O. I., Zermeno-González, H., & Preciado-Rangel, P. (2022). Profundidad de la cinta de riego y estiércol solarizado en la producción y calidad de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, número especial 28, 275-286.

Ramírez Galicia, K., López López, M. Á., Cetina Alcalá, V. M., & Mohedano Caballero, L. (2022). Prototipo de vivero forestal con fertirriego por subirrigación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 174-188. doi:10.29298/rmcf.v13i74.1195

Ríos-Ramírez, S. del C., Enríquez-del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Ruíz-Luna, J., Velasco-Velasco, V. A., & Sánchez-Mendoza, S. (2021). El crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. con relación a la condición nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 865-873. doi:10.29312/remexca.v12i5.2638



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional  
**MÉTRICAS**  
MULTIDISCIPLINARIAS

Sánchez-Mendoza, S., & Bautista-Cruz, A. (2022). Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. *Entreciencias*, 10(24), e2482738. doi:10.22201/enesl.20078064e.2022.24.82738

Sánchez-Mendoza, S., Bautista-Aparicio, G., & Bautista-Cruz, A. (2022). Inorganic fertilization improves *Agave potatorum* Zucc growth and nutrition. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 49(3), 147-156. doi:10.7764/ijanr.v49i3.2338

Soto-Bravo, F., & Monge-Palma, J. I. (2023). Comportamiento morfofisiológico y productivo de chile dulce hidropónico en invernadero con diferentes estrategias de manejo del fertiriego. *Agronomía Costarricense*, 47(1), 37-57. doi:10.15517/rac.v47i1.53948

Velasco-Cruz, A. L., Velasco-Velasco, V. A., Ruíz-Luna, J., Enríquez-del Valle, J. R., Martínez-Gutiérrez, A., Guzmán-Sebastián, K. del C., & Velasco-Cruz, A. del J. (2023). Efecto del uso de agua residual tratada sobre el suelo y cultivos forrajeros de *Chenopodium quinoa* Willd y *Zea mays* L. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(4), 874-895.

Zepeda-Bautista, R., Virgen-Vargas, J., Suazo-López, F., Arellano-Vázquez, J. L., & Ávila-Perches, M. Á. (2021). Nitrógeno en fertiriego para producir semilla de líneas progenitoras y cruas simples de maíz: dosis y distribución. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(2), 191-200. doi:10.35196/rfm.2021.2.191

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés