

EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL ESTADO NUTRIMENTAL DEL NOPAL-VERDURA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES ON THE NUTRITIONAL STATUS OF NOPAL-VEGETABLE (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIETY MILPA ALTA

Zamora Morales, B.P., A. Báez Pérez, L. Bonilla-Valencia, J. A. Zegbe Domínguez, M. C. Zamora-Martínez, A. Quevedo-Nolasco

EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL ESTADO NUTRIMENTAL DEL NOPAL-VERDURA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES ON THE NUTRITIONAL STATUS OF NOPAL-VEGETABLE (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIETY MILPA ALTA



Efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental del nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variedad Milpa Alta

Effect of soil physical and chemical properties on the nutritional status of nopal-vegetable (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variety Milpa Alta

Zamora Morales, B.P.,
A. Báez Pérez,
L. Bonilla-Valencia,
J. A. Zegbe Domínguez,
M. C. Zamora-Martínez,
A. Quevedo-Nolasco

EFFECTO DE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS Y
QUÍMICAS DEL SUELO EN
EL ESTADO
NUTRIMENTAL DEL
NOPAL-VERDURA (*Opuntia
ficus-indica* (L.) Mill.)
VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL
PHYSICAL AND CHEMICAL
PROPERTIES ON THE
NUTRITIONAL STATUS OF
NOPAL-VEGETABLE
(*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.)
VARIETY MILPA ALTA

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 307-324. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.18

Bertha Patricia Zamora-Morales / zamora.patricia@inifap.gob.mx 
<https://orcid.org/0000-0002-8724-6681>

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de
Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5 Col. Barrio de Santa
Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México*

Aurelio Báez-Pérez / baez.aurelio@inifap.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0002-4792-2817>

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Centro de Investigación Regional Centro (CIR-Centro)
Campo Experimental Bajío (CE-Bajío)
Carretera Celaya San Miguel Allende Km. 6.5 Celaya, Gto, C.P. 38110*

Leticia Bonilla-Valencia / bonilla.leticia@inifap.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0003-1246-0621>

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de
Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5
Col. Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México*

Jorge Artemio Zegbe-Domínguez / zegbe.jorge@inifap.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6925-5445>

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Centro de Investigación Regional Norte Centro (CIR-NOC)
Campo Experimental Pabellón (C.E. Pabellón) Kilómetro 32.5 Carretera
Aguascalientes – Zacatecas, Pabellón de Arteaga, Ags. C.P. 20660*

Marisela Cristina Zamora-Martínez / zamora.marisela@inifap.gob.mx
<https://orcid.org/0000-0003-0880-396X>

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de
Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5 Col. Barrio de Santa
Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México*

Abel Quevedo-Nolasco / anolasco@colpos.mx
<https://orcid.org/0000-0003-3303-5077>

*Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Programa de Hidrociencias
Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México*

RESUMEN Con el objetivo de analizar el efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo sobre el estado nutrimental de los cladodios de nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variedad Milpa Alta, se recolectaron muestras de suelo y de cladodios en cuatro Unidades de Producción Familiar (UPF) en Milpa Alta, Ciudad de México.

Para determinar la relación entre los resultados del análisis proximal (proteína, extracto etéreo, cenizas, fibra dietética y carbohidratos) de los cladodios y las condiciones edáficas de las UPF evaluadas, se realizó un análisis multivariado por componentes principales (CP); además de un análisis de correlación de Spearman ($P < 0.05$) y un modelo de ecuaciones estructurales (MEE). El análisis físico y químico de los suelos indicó una textura franca con cuatro variantes, sin problemas de compactación y concentraciones elevadas de N inorgánico ($N-NO_3 + N-NH_4$) y fósforo extractable. El CP determinó que el N y P del suelo se relacionan con el contenido de proteínas en los cladodios, y presentan una relación antagonista con el pH y la salinidad del suelo. El MEE demostró que la optimización de los niveles de K podría mejorar la calidad proteica de los cladodios, mientras que un control adecuado de Zn y de los carbonatos en el suelo evita efectos adversos sobre el contenido de fibra. Las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados tienen un efecto significativo sobre las características nutrimentales de los cladodios de nopal variedad Milpa Alta, particularmente en las concentraciones de micronutrientes (Zn, Fe y Cu) relacionados con la calidad comercial del producto.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., ceniza, fibra, macronutrientes, micronutrientes, salinidad del suelo.

ABSTRACT: In order to analyze the effect of soil physical and chemical properties on the nutritional status of nopal-vegetable cladodes (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variety Milpa Alta, soil and cladode samples were collected in four Family Production Units (UPF) in Milpa Alta, Mexico City. To determine the relationship between the results of the proximal analysis (protein, ethereal extract, ash, dietary fiber and carbohydrates) of the cladodes and the edaphic conditions of the evaluated UPFs, a multivariate analysis by principal components (PC) was performed; in addition to a Spearman correlation analysis, ($P < 0.05$) and a structural equation model (SEM). The physical and chemical analysis of the soils indicated a loam texture with four variants, no compaction problems and high concentrations of inorganic N ($N-NO_3 + N-NH_4$) and extractable phosphorus. The CP determined that soil N and P are related to protein content in cladodes, and present an antagonistic relationship with soil pH and salinity. The SEM showed that optimizing K levels could improve the protein quality of cladodes, while adequate control of Zn and soil carbonates avoids adverse effects on fiber content. The physical and chemical properties of the soils evaluated have a significant effect on the nutritional characteristics of nopal cladodes the Milpa Alta variety, particularly in the concentrations of micronutrients (Zn, Fe and Cu) related to the commercial quality of the product.

Key words: *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., ash, fiber, macronutrients, micronutrients, protein, soil salinity

INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) es una planta que presenta un sistema fotosintético denominado metabolismo ácido crasuláceo, altamente eficiente en el uso del agua lo que permite su desarrollo en zonas áridas y semiáridas del mundo (Cushman & Borland, 2002). Se cultiva para uso terapéutico, industrial, consumo animal y humano (González, 2010; Méndez-Gallegos & García-Herrera, 2006; Meraz-Maldonado *et al.*, 2012). El género *Opuntia* incluye variedades específicas productoras de fruta, para consumo animal como forraje y para nopal-verdura (cladodios tiernos o nopalito) utilizados en la alimentación humana (Roldán-Cruz & Chavarría-Miranda, 2022). Esta última forma parte de la cocina tradicional mexicana (Casas & Barbera, 2002); su consumo per cápita es de 6.4 kg^{-1} y contribuye a la lucha contra la inseguridad alimentaria en México (Inglese *et al.*, 2018).

En el país, se cultivan anualmente 12,580 ha con nopal verdura; los principales estados en superficie cultivada y producción son: Morelos (47.2%; 97.4 t ha^{-1}), Ciudad de México (22.4%; 90.4 t ha^{-1}), Tamaulipas (1.3%; 12.0 t ha^{-1}), Estado de México (10.1%; 88.8 t ha^{-1}), Michoacán (3.9%; 45.0 t ha^{-1}), Jalisco (3.4%; 39.6 t ha^{-1}) y Puebla (3.8%; 75.4 t ha^{-1}) (Servicio de Información

Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021; 2024). Los dos primeros estados concentran la mayor superficie cultivada con nopal-verdura, debido a su alta calidad (Inglese *et al.*, 2018).

El sistema de cultivo del nopal-verdura se caracteriza por la aplicación de conocimientos transmitidos por generaciones, lo que ha favorecido el mantenimiento de las tradiciones agrícolas (Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades [SEDEREC], 2016). También, la permanencia del régimen de tenencia comunal de la tierra (Bonilla-Rodríguez, 2014) ha contribuido a que los pobladores conserven la memoria histórica, tanto del arraigo agrícola como de sus costumbres; condiciones que han influido en el significado socio-cultural que ostenta el cultivo del nopal-verdura en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México (Bonilla-Rodríguez, 2009). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que el interés en diversas especies del género *Opuntia* se ha incrementado debido al papel sobresaliente que tienen en los sistemas de agricultura sustentable, sobre todo en áreas marginales de zonas áridas y semiáridas (Reynolds *et al.*, 2003). Esto obliga al sector agrícola a buscar e implementar estrategias y tecnologías de producción que acrecenten y mejoren la calidad del cultivo, en un contexto de sustentabilidad y en función del calentamiento global (Medina-García *et al.*, 2021). Dado el valor comercial de los productos derivados de las partes aéreas del nopal, la investigación se ha orientado a la evaluación de los rendimientos de dichos órganos (Galicia-Villanueva *et al.*, 2017). En contraste, existe escasa investigación enfocada a estudiar los efectos de las condiciones edáficas sobre la disponibilidad de nutrimentos; así como del impacto de estas en la producción y productividad del nopal-verdura (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009). Por lo tanto, orientar la investigación hacia aspectos básicos, como la fertilidad del suelo y su influencia en el estado nutrimental de la planta, resulta fundamental para reducir esa brecha y desarrollar recomendaciones que promuevan un cultivo sustentable, con características nutraceuticas y funcionales óptimas para el consumo humano (Atalah & Pak, 1997; Cárdenas *et al.*, 2019). Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en determinar el efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental de nopal-verdura variedad Milpa Alta.

La hipótesis planteada estima que las características nutrimentales de esta variedad son determinadas por las propiedades físicas y químicas del suelo en el que se establece su cultivo. Para ello, se consideró: 1) realizar un diagnóstico de sus concentraciones nutrimentales, 2) evaluar la relación entre las propiedades químicas del suelo y las concentraciones nutrimentales del nopal-verdura, y 3) determinar cómo las características del suelo influyen sobre las concentraciones de las principales variables asociadas al análisis proximal: proteína, fibra y cenizas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

El estudio se realizó en marzo de 2020 en cuatro Unidades de Producción Familiar (UPF) de nopal-verdura, variedad Milpa Alta, de la alcaldía Milpa Alta Ciudad de México (Tabla 1). Milpa Alta, una de las 16 demarcaciones de la Ciudad de México, se ubica en su extremo sureste, en una zona elevada de aproximadamente 2,600 metros sobre el nivel del mar. Limita con las alcaldías Tláhuac, Xochimilco, Magdalena Contreras, Tlalpan y con el Estado de México, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). El clima predominante es templado semiárido con lluvias en verano, temperaturas anuales promedio entre 13 °C y 16 °C. Durante los meses cálidos, las temperaturas pueden llegar a 27 °C, mientras que en invierno se registran hasta 3 °C. La precipitación anual varía entre 600 y 800 mm, concentrándose en los meses de verano, y la humedad relativa suele ser de 60 a 70% (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2022; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).

Características físicas y químicas de los suelos

En cada sitio de estudio se recolectaron muestras de suelo compuestas por cinco submuestras en cinco puntos ubicados de manera aleatoria. La profundidad de muestreo fue de 0-40 cm, y a partir de estas se generaron tres muestras compuestas. La caracterización física y química de los suelos

se realizó en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Las determinaciones físicas fueron: textura, punto de saturación, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (DA).

El análisis químico incluyó las siguientes determinaciones: pH, conductividad eléctrica (CE, en extracto de saturación), materia orgánica (MO), fósforo extractable Bray-1, macroelementos y microelementos; mientras que el estudio de la salinidad se basó en la determinación del pH (en extracto de saturación), bases intercambiables, salinidad efectiva y relaciones de cambio. El análisis proximal consistió en determinar, el contenido de proteína, extracto etéreo y cenizas por los métodos descritos por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1990). La fibra dietética se obtuvo mediante el método gravimétrico de (Prosky *et al.*, 1988); y los carbohidratos por diferencia porcentual con el resto de los componentes del análisis químico.

Tabla 1. Características generales de los sitios considerados en el diagnóstico nutrimental de cladodios tiernos de nopal-verdura variedad Milpa Alta.

Table 1. General characteristics of the sites considered in the nutritional diagnosis of tender cladodios of nopal-vegetable variety Milpa Alta.

Variable	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
Localidad	BSM	SPA	SFT	SM
Latitud norte	19°13'09.7"	19°12'49.72"	19°20'41.67"	19°91'33.2"
Longitud oeste	99°01'53.1"	99°02'17.62"	98°97'63.89"	99°04'01.20"
Altitud	2 558	2 508	2 265	2 510
Superficie (ha)	0.68	0.65	0.25	0.75
DP (plantas ha ⁻¹)	27 776.	22 222	20 000	22 222
FE (kg ha ⁻¹)	144 000	4 394	144 000	120 000
Plagas	Cochinilla, chinche roja	Cochinilla	Cochinilla	Caracol
Enfermedades	Mancha negra	Mancha negra	Mancha negra	Mancha negra
Rendimiento (t ha ⁻¹)	88	84	88	84

BSM: Barrio Santa Martha; SPA: San Pedro Actopan; SFT: San Francisco; Tecoxpa; SM: San Mateo; DP: densidad de siembra; FE: Fertilización equina

BSM: Barrio Santa Martha; SFT: San Francisco; Tecoxpa; SM: San Mateo; SPA: San Pedro Actopan DP: sowing density; FE: equine fertilization.

Determinación nutrimental de los cladodios

Las muestras del material vegetativo se recolectaron en los mismos puntos del muestreo de suelos, se recolectaron tres submuestras, cada una compuesta por tres cladodios de tamaño comercial (18.0 – 25.0 cm de longitud). Estas fueron empaquetadas, etiquetadas y transportadas en hieleras, para los análisis nutrimentales, al Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del INIFAP-Campo Experimental Bajío. Previo a la determinación de la composición nutrimental, se registró el peso húmedo, peso seco, humedad, área y grosor de cada cladodio (AOAC, 1980). Posteriormente, las muestras fueron secadas con aire forzado (FELISA modelo: FE-292AD) a 72 °C por 72 h, en seguida se registró su peso seco y se determinó la humedad. El material vegetativo seco, se molió con un molino de cuchillas (Modelo GE 4305 Arthur H. Thomas, Chadds Ford, PA, USA). El material resultante se homogenizó y nuevamente se molió en mortero de porcelana y tamizó en malla número 35 (0.5 mm).

El N se determinó por el método MicroKjeldahl (Bremner, 1965); mientras que el P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B se obtuvieron por filtrado del extracto proveniente de la digestión húmeda de cada muestra. Las concentraciones de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B se cuantificaron por medio de un espectrómetro de emisión atómica (Modelo Thermo Scientific iCE 3000 Series Atomic Absorption Spectrometers, CITY, USA). La concentración de P se determinó por colorimetría del complejo fosfovanadomolibdato con el método descrito por la AOAC (1980). Las lecturas se hicieron a 470 nm en un espectrofotómetro (Modelo Milton Roy® modelo Spectronic 20, CITY, USA).

Análisis estadístico

El análisis estadístico incluyó una prueba de Kruskal-Wallis para determinar la existencia de diferencias significativas del contenido de nutrientes en los cladodios entre los cuatro sitios de producción de nopal verdura muestreados, considerando un valor de $P < 0.05$ (Distribución no Gaussiana). Para determinar la relación entre los macronutrientes, micronutrientes, proteína, Na y las condiciones edáficas, se ejecutaron análisis multivariados por componentes principales (CP) con el programa R (Oksanen, 2017); además de un análisis de correlación de Spearman, con un valor de $P < 0.05$ (Distribución no Gaussiana) con el programa R V 4.2 (R Development Core Team, 2024). Se construyó un modelo de ecuaciones estructurales (MEE), para analizar las relaciones de causalidad del efecto de las propiedades químicas del suelo (pH, nutrientes, materia orgánica, entre otras) sobre las concentraciones de proteína, fibra y cenizas en los cladodios, y su ajuste se determinó seleccionado el modelo acorde con el valor de P. El MEE, permite modelar relaciones multivariadas, en la cual los efectos se establecen entre interacciones directas e indirectas entre variables. El ajuste de MEE se evaluó mediante el enfoque *piecewise structural equation modeling* (piecewise SEM), utilizando el paquete *piecewiseSEM* en R (Lefcheck, 2016). Esto permite determinar la plausibilidad del modelo, mediante el estadístico Fisher's C, donde un valor de $P > 0.05$ indica que no hay evidencia estadística para rechazar el modelo propuesto. Con base en este criterio, se compararon diversos modelos alternativos formulados a partir de hipótesis documentadas en la literatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis físico, fertilidad y salinidad del suelo en el área de estudio

El análisis físico del suelo de los sitios evaluados sugirió que la clase textural predominante fue la franca, con cuatro variantes (Tabla 2). Sin embargo, con base en la carta de clasificación de suelos (Secretaría de Protección Civil de la CDMX [SPC], 2014) en todos los sitios de estudio correspondió al tipo Andosol (textura media). La densidad aparente (DA) fluctuó entre 1.03 y 1.1 g cm³. Solo se observó compactación el Sitio 3 que presentó el valor más alto de DA (1.16 g cm³). El punto de saturación varió de 58 a 65%, la capacidad de campo (CC) entre 36.5 y 47%, y el punto de marchitez permanente (PMP) de 19.2 a 24.6%. Los valores son indicativos de suelos con bajo grado de compactación, que favorece la penetración de raíces e infiltración del agua. No obstante, las diferencias en la CC (36 - 47%) y el PMPe (19.20 – 24.6%) reflejan una variabilidad en la capacidad de retención de agua entre los sitios.

En el sitio 3 se observó un mayor contenido de arcilla (27.17%) y el valor más alto de CC (47%), lo cual es benéfico para la disponibilidad de agua en periodos críticos del cultivo (Santander *et al.*, 2024). En sitios con menor capacidad de retención hídrica, como el sitio 4, se subraya la necesidad de implementar prácticas de manejo específicas, como la aplicación de materia orgánica para mejorar su estructura y así aumentar la retención de humedad (Guo *et al.*, 2016).

Tabla 2. Análisis físico de los suelos en los sitios de muestreo cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.**Table 2.** Physical analysis of soils in sampling sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City.

Sitio	Arena	Limo	Arcilla	Clase	DA	Saturación	CC	PMP
	%			Textural	g cm ³	%		
1	70.25	11.91	17.84	Areno Franco	1.03	58.67	44.00	23.10
2	56.25	18.57	25.17	Franco	1.06	56.00	42.00	22.03
3	54.92	17.91	27.17	Franco	1.02	62.67	47.00	24.60
4	65.59	14.57	19.84	Franco Arenoso	1.16	65.33	36.50	19.20

DA: densidad aparente; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente.

DA: apparent density; CC: field capacity; PMP: permanent wilting point.

Debido a que el área de estudio está ubicada en una zona volcánica (Eje Neovolcánico Transversal), cuya vegetación original era una asociación de pino-encino, se esperaría la presencia de suelos con pH ácido (Burgess-Conforti *et al.*, 2019). No obstante, el análisis de la fertilidad de suelo indicó un pH que varió de ácido a alcalino (6.38-8.06) (Tabla 3). La alcalinidad puede deberse a la perturbación de los suelos como resultado de la deforestación, la implementación de sistemas de producción agrícola y la incorporación de estiércol y otros abonos orgánicos de diferente índole (Burgess-Conforti *et al.*, 2019).

El contenido de materia orgánica (MO) fluctuó entre 2.56 y 3.64% (Tabla 3); para este tipo de suelos un contenido de 3 a 5% de materia orgánica se considera de medio a alto (Béjar-Pulido *et al.*, 2021). Por otra parte, el contenido de N inorgánico (N-NO₃ + N-NH₄) (45.42 - 130.48) y fósforo extractable (186.14 - 405.08) fueron altos de acuerdo con Tavera-Cortés *et al.*, (2018) (Tabla 3). Lo anterior se explica por la cantidad y frecuencia de aportes de materia orgánica y fertilizantes químicos en los suelos del área bajo estudio, los que incluyen el material vegetal de la poda del nopal, el estiércol usado como fertilizante (Tavera-Cortés *et al.*, 2018) y materiales como aserrín (carpinterías de la zona).

Aun cuando el análisis de Kruskal Wallis no reveló diferencias significativas entre sitios, los valores diferentes en los parámetros edáficos pueden tener implicaciones importantes para la especie de estudio. El Sitio 1 presentó un pH ácido (6.38) y alto contenido de MO (3.25%); mientras que, los contenidos de nutrientes como el nitrógeno inorgánico (45.42 mg kg⁻¹) y fósforo extraíble (P) (275.37 mg kg⁻¹) correspondieron a valores favorables para un buen desarrollo del cultivo. El Sitio 2 presentó un pH alcalino (8.06), y concentraciones de N, P, Mg, Ca y K significativamente más altos (Tabla 3); con respecto a los otros sitios bajo estudio, las condiciones de mayor alcalinidad podrían afectar la disponibilidad de estos nutrientes, en especial de P (Bejar-Pulido *et al.*, 2020). El sitio 3, con pH de 7.97 y 2.56% de MO mostró un equilibrio entre nutrientes. El sitio 4, con pH de 7.53 y 3.05% de MO (Tabla 3) tuvo el menor contenido de P extraíble (186 mg kg⁻¹); no obstante, la reserva es alta, por lo que un adecuado manejo puede mejorar los niveles de nutrientes y su disponibilidad (Vázquez, 2023). En este sentido, se debe considerar que el nopal es un cultivo perenne y durante su producción se realizan prácticas mínimas de labranza, por lo que los nutrientes se incorporan lentamente, lo cual es probable que incida en el crecimiento y balance nutrimental de las plantas (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009).

Estudios previos han señalado que la calidad nutritiva del nopal varía en función de factores edáficos, climáticos y culturales como la fertilización y el manejo poscosecha. Lo anterior fue señalado por Santiago-Lorenzo *et al.*, (2016) quienes indican que la calidad nutritiva del nopal-verdura responde a su composición mineral, la cual es variable según la fertilización, manejo poscosecha y el estado de madurez (Silva *et al.*, 2021).

Tabla 3. Análisis de fertilidad de suelo de los sitios cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.**Table 3.** Soil fertility analysis of sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City.

Sitio	pH	CE dS m ⁻¹	MO %	N mg kg ⁻¹	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
1	6.38	0.45	3.25	45.42	275.37	1102	1812	519	55.3	94.0	12.5	10.8	3.5
2	8.06	0.51	3.64	130.48	405.08	2048	3227	839	48.7	30.3	7.6	4.8	2.1
3	7.97	0.49	2.56	76.42	293.14	1493	2802	804	44.7	37.0	6.5	3.8	1.8
4	7.53	0.35	3.05	68.01	186.14	1100	2364	668	32.0	33.7	4.1	3.1	1.3

El estudio de salinidad evidenció que los suelos no presentaban problemas serios en contenido de sales, ya que los suelos estudiados tuvieron un pH (en extracto de saturación) que indicó moderadas concentraciones de sales (Tabla 4), cuyos valores fueron atribuibles a la abundante aplicación de estiércol, como fertilizante (Tavera-Cortés *et al.*, 2018); además, el nopal es un cultivo rústico, con alta tolerancia a la alcalinidad (Hernández-Urbiola *et al.*, 2011). En el sitio 2 se registró una salinidad alta (CE = 1.39 dS m⁻¹), y concentraciones más altas de sodio (Na = 1.71 meq L⁻¹) y potasio (K = 5.28 meq L⁻¹), lo que podría generar estrés en las plantas debido a que se altera modificaciones en la absorción de agua y nutrientes (Martínez-Villavicencio *et al.*, 2011); pero el valor de conductividad eléctrica clasifica al suelo como uno no salino (NOM-021-RECNAT-2000).

Por otro lado, en el sitio 1, hubo menor salinidad (CE = 0.56 dS m⁻¹). Los valores de Na fueron menores, lo que indica un ambiente más favorable para el crecimiento del nopal. La baja concentración de cloruros (Cl) y sulfatos (SO₄) en este sitio, también sugiere que las condiciones son menos propensas a inducir déficit hídrico en las plantas, lo cual permite una mayor disponibilidad de agua y nutrientes (Mitma-Ramírez, 2024).

Tabla 4. Análisis de la salinidad de los suelos muestreados en cuatro sitios cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México. En extracto de saturación.**Table 4.** Analysis of soil salinity of the soils sampled at four sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City. In saturation extract.

Sitio	pH	CE dS m ⁻¹	Ca meq L ⁻¹	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	Cl ⁻	SO ₄
1	7.95	0.56	2.34	3.64	1.00	0.94	0.40	0.12	1.56	3.50
2	8.53	1.39	4.12	6.92	1.71	5.28	0.70	0.12	3.01	10.08
3	8.42	0.98	3.44	5.75	1.27	2.83	0.58	0.12	2.51	6.64
4	8.56	1.10	4.68	6.97	1.77	2.31	1.05	0.12	3.81	6.07

Análisis de tejido vegetal y sistemas de producción

Atributos físicos y del crecimiento de los cladodios de nopal verdura

El análisis de los atributos físicos y de crecimiento de los cladodios evidenció la ausencia de diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre sitios (Tabla 5). La humedad en las muestras frescas de nopal fluctuó entre 93.3 y 94.1% y fueron congruentes con la norma NMX-FF-068-SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006), la cual establece que debe ser superior a 90%; asimismo, concuerda con lo documentado por diversos autores, quienes registran valores superiores a 90%. Este resultado es soportado por aquellos valores registrados por Betancourt-Domínguez *et al.* (2006) y Maki-Díaz *et al.*, (2015). La materia seca varió entre 5.9 y 6.7%. Las longitudes de los cladodios muestreados correspondieron a la clasificación B de la norma oficial NMX-FF-068-

SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006): A > 25 cm; B = 18.1-25.0 cm; C = 11.-18.0 cm; Cambray = 7.0-11.0 cm (Maki-Díaz *et al.*, 2015).

En la Tabla 5 se presentan los resultados promedio del análisis proximal hecho a los cladodios. El análisis estadístico no evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los sitios para estas variables respuesta. Respecto al contenido de fibra cruda, Rives-Castillo *et al.* (2021) señalan que en el nopal corresponde al contenido total de carbohidratos digeribles y no digeribles; trabajos recientes han citado que la proporción de fibra en los cladodios de nopal oscila entre 12 y 20% en base seca, y varía según factores como la variedad, las condiciones de cultivo y el momento de cosecha (Fernández *et al.*, 2019; López & Pérez, 2021); en ese intervalo se están los valores registrados en los sitios 2 y 3, de ellos el sitio 2 presentó los más altos (22.2%) (Tabla 5); donde también se observaron los mayores contenidos en el suelo de N, P Mg, Ca, K, (Tablas 3 y 4); estas características hacen que los cladodios se consideren una fuente importante de fibra dietética, lo que incrementa su valor nutricional y su posible aplicación en dietas tanto humanas como de animales de consumo (García *et al.*, 2018; Martínez *et al.*, 2022).

La proteína cruda, con base en peso seco, tuvo valores entre 12.41 y 14.54% (Tabla 5), que superiores a los indicados por Cornejo-Villegas *et al.* (2010) y Astello-García *et al.* (2015); también los valores promedio para grasa cruda fueron mayores a los documentados por Perucini-Avendaño *et al.* (2021). El sitio 1 presentó los valores más altos tanto para fibra como para el contenido de grasa cruda. Referente a los contenidos en fresco para proteína fueron similares a los registrados por Angulo-Bejarano *et al.*, (2014); mientras que, para grasa cruda, los porcentajes del presente estudio fueron superiores a los indicados por dichos autores (0.2%).

Respecto al contenido de ceniza en peso seco, varió de 17.2 a 19.6%. Estos resultados se asocian a la especie y coinciden con lo citado por González *et al.* (2016). Los valores de proteína cruda en los cladodios de nopal-verdura, aparentemente son altos, con base en el peso seco, pero el contenido sólo corresponde entre 6 y 7% del peso total; lo que significa que, en 100 g, de nopales frescos alrededor de 0.8 g corresponden a proteína cruda. En algunos estudios se señala que es posible asociar el valor nutricional de los cladodios de nopal verdura a su contenido de minerales y fibra dietética; y que esta última tiene un efecto potencial prebiótico, lo que se ha corroborado en estudios que abordan la evaluación de su viabilidad y actividad metabólica en intestino humano (Missaoui *et al.*, 2020).

Atributos nutrimentales de los cladodios de nopal verdura

El análisis de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) para el Zn entre los sitios 1 y 4, y para el Mn entre los sitios 1 y 3 (Tabla 5). En promedio, los cladodios del sitio 1 mostraron los valores más altos de Mn, N y proteína. El Mn desempeña un papel crucial en el proceso de la fotosíntesis, respiración y asimilación de nitrógeno, interviene en la síntesis de proteína, y podría explicar el vigor de los órganos vegetativos como los cladodios de nopal provenientes del sitio 1 (Blanco-Macías *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2019). Los cladodios del sitio 4 tuvieron en promedio, las concentraciones más altas de Zn, P, K y S; mientras que, las concentraciones promedio de Mg y Na fueron similares entre los sitios muestreados (Tabla 5). El S, aunque menos documentado en investigaciones de este cultivo, es necesario para la formación de aminoácidos como la metionina y la cisteína, fundamentales en la estructura proteica y la regulación metabólica (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009).

En contraste, el Zn en los humanos interviene en procesos de crecimiento y desarrollo, madurez sexual, respuesta inmune, sensibilidad de los sentidos del gusto y olfato (Solano *et al.*, 1998). Se estima que 83% de este mineral se localiza en músculos y huesos, y desempeña funciones importantes en más de 300 enzimas, incluidas las del ADN.

Cabe mencionar que las concentraciones de K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y Cu fueron menores a las indicados por Zúñiga-Tarango *et al.*, (2009). Las concentraciones del macro y micro elementos, en términos de intervalos de suficiencia nutrimental para *O. ficus-indica* sugieren que las de N, P, K y Mg registradas en este estudio fueron óptimas de acuerdo con lo consignado por Blanco-Macías *et al.*, (2009); sin embargo, la concentración de Ca fue ligeramente deficiente; mientras que las concentraciones de Zn, Fe y Cu fueron deficientes pero suficientes para el MN.

Tabla 5. Atributos físicos de crecimiento, análisis proximal, contenido nutrimental de cladodios de nopal-verdura recolectados en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

Table 5. Physical growth attributes, proximal analysis, nutritional content of nopal cladodes collected in the Milpa Alta municipality, Mexico City. Different letters represent significant differences by the Kruskal-Wallis test.

Variable	Sitio			
	1	2	3	4
A) Atributos físicos de crecimiento				
Largo	22.7	19.6	21.7	22.4
Ancho	10.6	9.5	10	9.9
Grosor	0.7	0.7	0.7	0.8
Peso Húmedo	122.9	88.3	113.1	111.7
Peso Seco	7.4	5.6	7.2	6.6
Humedad	93.9	93.3	93.5	94.1
Área	241.3	188.9	220.3	222.2
B) Análisis proximal (Base seca)				
Materia seca	6.1	6.7	6.5	5.9
Proteína cruda	14.54	12.41	12.41	13.92
Grasa cruda	11	9.4	9.4	10.5
Fibra cruda	11	22.2	14.5	18.5
Ceniza	17.6	17.2	19.6	19.7
c) Contenido nutrimental				
N	2.24	1.91	1.91	2.14b
P	0.26	0.24	0.24	0.35
K	5.34	5.34	5.34	5.57
Proteína	14.54	12.41	12.41	13.92
S	0.05	0.05	0.05	0.11b
Ca	2.06	2.42	2.42	1.94
Mg	1.07	1.16	1.16	1.24
Na	0.03	0.02	0.02	0.02
Fe	54	57	57	48.2
Zn	21.8b	21.1b	21.1b	23.0a
Mn	37.2a	26.1b	26.1b	25.9b
Cu	8	6.4	6.4	8.3

*Entre columnas, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) por la prueba de Kruskal-Wallis.

Relaciones del suelo con el contenido de macro y micronutrientes en cladodios de nopal-verdura

El análisis por componentes principales indicó que hubo una relación estrecha y positiva entre el contenido de proteína y las concentraciones de N total (%), P total (%) y K (mg kg^{-1}) de los cladodios con los macronutrientes del suelo, lo que fue más evidente en el sitio 2 (Figura 1A; Cuadrante I), el cual presentó una mayor concentración de estos elementos del suelo (Mg, Ca, K, P y N), además de los valores más altos de fibra en los cladodios de nopal-verdura (Tabla 5).

Los resultados son coherentes con estudios previos en los que se señala que el nitrógeno es fundamental para la síntesis de proteínas. El P también juega un papel crucial en la formación de proteínas y en la transferencia de energía en las plantas, mientras que el K está involucrado en la regulación del metabolismo de carbohidratos y la fotosíntesis (Molina & Rodríguez, 2012). Con base en lo anterior, es factible que la fertilización con estos macronutrientes mejore la calidad nutricional de los cladodios de nopal. Por otro lado, la relación negativa entre el contenido de proteína del nopal con las concentraciones de Na, Mg y Ca (Figura 1B) podría explicarse por el efecto antagonista que ciertos cationes, como el Mg y Ca, tienen sobre la absorción de nutrientes que favorecen la síntesis proteica (Molina & Rodríguez, 2012).

La figura 1B, muestra la relación que se generó entre el contenido de micronutrientes en los cladodios; los resultados indican que existe una relación negativa entre el contenido de proteína, Cu, Mn y las concentraciones de Cu, Zn y Mn del suelo (mg kg^{-1}). Es posible que niveles altos de Cu, Zn y Mn en el suelo o en el tejido vegetal interfieran en la síntesis o acumulación de proteínas, dado que ambos micronutrientes están involucrados en reacciones enzimáticas esenciales (López & Pérez, 2021).

En la figura 1C y D, se presenta la relación que hubo entre el contenido nutricional del nopal en función de la reacción del suelo y la salinidad. Se observa que existe una relación negativa entre el Mg, Na y Ca de los cladodios con la reacción del suelo y su salinidad. La respuesta en la asimilación de estos nutrientes sugiere que un pH más alto (condiciones alcalinas) puede limitar la disponibilidad de estos nutrientes para la planta, debido a la presión osmótica o menor movilidad en suelos alcalinos. Mientras que la relación con la salinidad edáfica refuerza la idea de que altos niveles de Na generan desequilibrios nutricionales. Este fenómeno se debe a que la alta concentración de ciertos cationes (como Na y Ca) compiten con otros elementos, lo cual limita su disponibilidad o absorción (Figueroa-Pérez *et al.*, 2018).

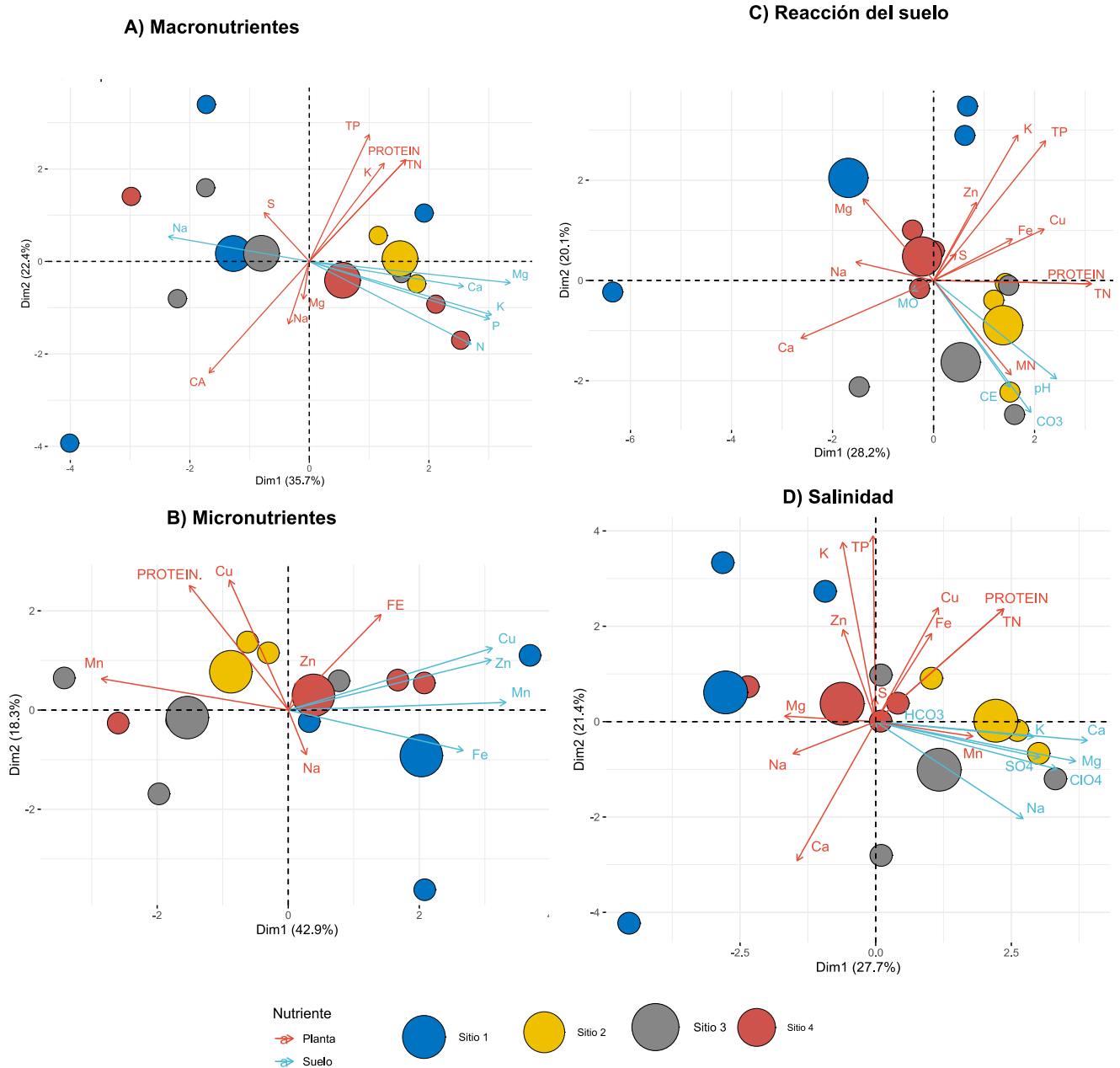


Figura 1. Análisis de componentes principales para evidenciar la relación entre el contenido de micronutrientes en cladodios de nopal-verdura (*O. ficus-indica* (L.) Mill. var. Milpa Alta y las características edáficas de macronutrientes (A), micronutrientes (B), reacción (C) y salinidad (D) de cuatro sitios productores de la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

Figure 1. Principal component analysis to demonstrate the relationship between micronutrient content in cladodes of nopal-vegetable (*O. ficus-indica* (L.) Mill. var. Milpa Alta) and the soil characteristics of macronutrients (A), micronutrients (B), reaction (C) and salinity (D) of four production sites in the Milpa Alta municipality, Mexico City.

Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la proteína, ceniza y fibra de los cladodios de nopal-verdura

El modelo de ecuaciones estructurales (MEE) evidenció un buen ajuste entre el modelo propuesto y el estimado (Fisher de $C=22.7$, $P<0.05$). En la Figura 2 se exhiben únicamente las relaciones de las variables que fueron significativas ($P<0.05$). El análisis detectó efectos positivos y significativos del Na y el K con la proteína cruda. En contraste, estos macro elementos junto con el Cu influyeron de manera negativa en el contenido de cenizas (Figura 2), lo que sugiere una posible alteración en el equilibrio iónico y mineral de los tejidos. El Zn y los CO_3 influyeron negativamente en la fibra, mientras que la MO registró un efecto positivo en el contenido de fibra cruda (Figura 2).

La optimización de los niveles de K y Na podrían maximizar la calidad proteica de los cladodios; mientras que, un control cuidadoso del Zn y los carbonatos en el suelo evitarían efectos adversos sobre la fibra (Mondragón-Jacobo & Méndez-Gallegos, 2018). Los resultados sugieren que elementos como el Na y K tienen un papel relevante en la síntesis y acumulación de proteínas (Aguilar-Carpio *et al.*, 2016). El potasio es esencial en el mantenimiento del equilibrio osmótico, la activación enzimática, y síntesis de aminoácidos; el sodio, en cantidades controladas, desempeña funciones regulatorias en condiciones específicas, ya que ayuda en el metabolismo y balance hídrico (Aguirre & Santiago, 2018).

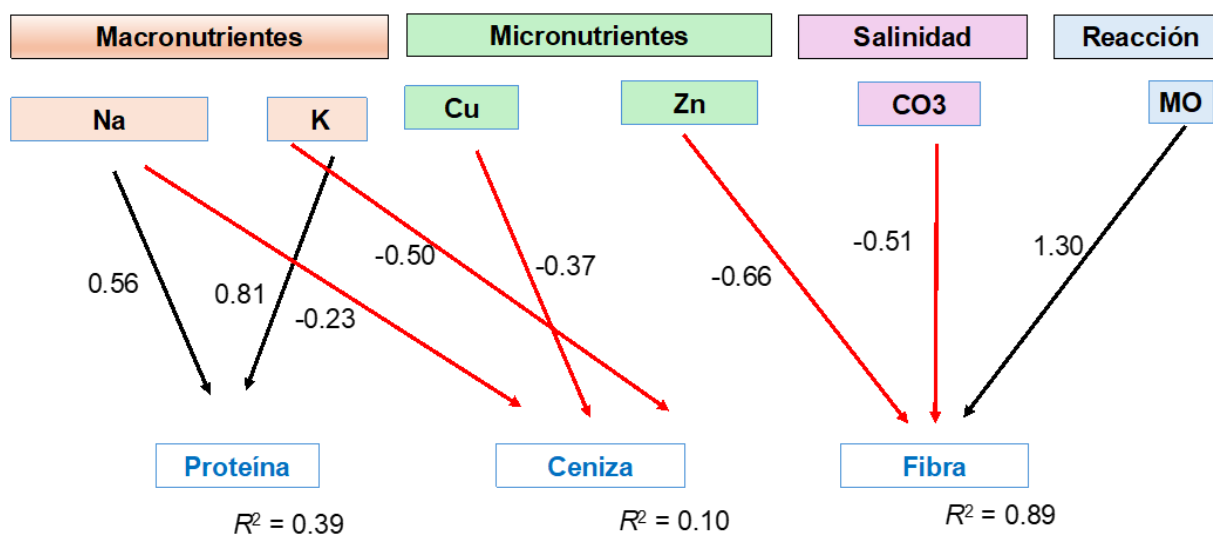


Figura 2. Modelos de ecuaciones estructurales para el efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la proteína, ceniza y fibra de los cladodios de nopal verdura variedad Milpa Alta. Las flechas rojas representan efectos negativos y las flechas negras efectos positivos. R^2 es el coeficiente de determinación y explica en porcentaje de la cantidad de la variación Y en función de X (efectos-respuestas).

Figure 2. Structural equation models for the effect of soil chemical properties on protein, ash and fiber of Milpa Alta variety nopal cladodes. Red arrows represent negative effects and black arrows positive effects. R^2 is the coefficient of determination and explains in percentage the amount of variation Y as a function of X (effects-responses).

En su conjunto los resultados de este trabajo permitieron alcanzar el objetivo establecido y validaron la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados ejercen un efecto significativo sobre las características nutrimentales de los cladodios de nopal verdura de la variedad Milpa Alta, particularmente en las concentraciones de micronutrientes Zn, Fe y Cu, los cuales están relacionados con la calidad comercial del producto.

Los suelos franco-texturales analizados presentan una buena estructura, sin compactación excesiva; sin embargo, se observaron variaciones en la capacidad de retención de agua y en la salinidad entre los diferentes sitios de muestreo. En particular, el sitio 3, con mayor contenido de arcilla, muestra una retención de agua más eficiente, lo cual resulta útil en épocas de escasez hídrica; por otro lado, el sitio 4 requeriría un manejo agronómico adaptado a su menor capacidad de retención.

A pesar de que los niveles de nitrógeno y fósforo de los suelos estudiados son adecuados para el desarrollo vegetativo del nopal, es necesario atender deficiencias en micronutrientes y ajustar el pH del suelo en algunos sitios, ya que estos factores pueden limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales.

Aun cuando el sistema de producción bajo estudio mantiene una aportación constante y abundante de materia orgánica al suelo, los procesos de mineralización y la calidad de la materia orgánica edáfica no garantizan un aporte nutrimental suficiente, especialmente en lo que respecta a micronutrientes. Los análisis mediante ecuaciones estructurales (MEE) muestran que elementos como el potasio (K) influyen positivamente en el contenido de proteínas, mientras que las deficiencias de zinc (Zn) y la alta presencia de carbonatos (CO₃) afectan negativamente los porcentajes de fibra en los cladodios.

RECOMENDACIONES

En las áreas de producción de nopal se recomienda la implementación de programas de fertilización y prácticas de manejo que se basen en las condiciones edáficas de cada huerto.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Carpio, C., Rangel-Estrada, S. E., Sánchez-Mendoza, S. M. y Pérez-Ramírez, A. (2016). Control químico de maleza en nopal verdura [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.er]. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 2(1), 12-16. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6201366.pdf>
- Aguirre, A., y Santiago, S. (2018). Funciones fisiológicas del potasio y sodio en plantas: Implicaciones para el manejo de cultivos en condiciones de estrés. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(4), 589-602. <https://doi.org/10.22201/fesz.20074793e.2018.9.4.289>
- Angulo-Bejarano P. I., Martínez-Cruz, O., & Paredes-López, O. (2014). Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: Nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science*, 10(3), 196-217. <https://www.ingentaconnect.com/content/ben/cnf/2014/00000010/00000003/art00005>
- Association of Official Analytical Chemist. (1980). *Official Methods of Analysis*. AOAC.
- Association of Official Analytical Chemist (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (Vol. II). AOAC.
- Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. D. S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., & Barba de la Rosa, A. P. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>
- Atalah, E., y Pak, N. (1997). Aumente el consumo de verduras, frutas y legumbres. En C. Castillo, R. Uauy, y E. Atalah (Edits.), *Guías de alimentación para la población chilena*. (págs. 79-89). Imprenta La Nación.
- Bejar-Pulido, S. J., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M. I. y Luna Robles, E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 31-50. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>

- Béjar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., & Luna-Robles, E. O. (2021). Effect of different land use on chemical properties of an Andosol in Michoacán, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(3), Article 121. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3629>
- Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A., & Paredes-López, O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitas) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, 115-119. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0008-6>
- Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., Valdez-Cepeda, R. D., Vázquez-Alvarado, R., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Ornelas, E., y Vidales-Contreras, J. A. (2009). Comparación entre normas DNC y estándares nutrimentales de la técnica de curva límite: CASO *Opuntia ficus-indica* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15, 217-223. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000200017&lng=es
- Bonilla-Rodríguez, R. (2014). Urbanización rural y economía agrícola de sobrevivencia en la Delegación ‘Milpa Alta’. *Argumentos*, 27(74), 195-215. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952014000100008&lng=es&tlng=es
- Bonilla-Rodríguez, R. (2009). Agricultura y tenencia de la tierra en ‘Milpa Alta’: Un lugar de identidad. *Argumentos*, 22(61), 249-282. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952009000300011&lng=es&tlng=es
- Bremner, J. M. (1965). Inorganic forms of nitrogen. In A. G. Norman (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part. 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 1179-1237). American Society of Agronomy. Agronomy Monograph 9.2.
- Burgess-Conforti, J. R., Moore Jr., P. A., Owens, P. R., Miller, D. M., Ashworth, A. J., Hays, P. D., Evans-White, M. A., & Anderson, K. R. (2019). Are soils beneath coniferous tree stands more acidic than soils beneath deciduous tree stands? *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 14920-14929. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04883-y>
- Cárdenas, Y., Ríos-Silva, M., Huerta, M., López, M., Bricio-Barrios, J., Ortiz-Mesina, M., Urzúa, Z., Saavedra-Molina, A., & Trujillo, X. (2019). The comparative effect of nopal and mucilage in metabolic parameters in rats with a high-fructose diet. *Journal of Medicinal Food*, 22(5), 538-541. <https://doi.org/10.1089/jmf.2018.0124>
- Casas, A., & Barbera, G. (2002). Mesoamerican domestication and diffusion. In P. S. Nobel, *Cacti: Biology and uses* (pp. 143-162). University of California Press.
- Comisión Nacional del Agua. (2022). *Clima y precipitaciones en la Ciudad de México*. Comisión Nacional del Agua. <https://www.conagua.gob.mx>
- Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M., Herrera, G., & Rodríguez-García, M. E. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering*, 96(3), 401-409. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.014>
- Cushman, J. C., & Borland, A. M. (2002). Induction of Crassulacean acid metabolism by water limitation. *Plant Cell and Environment*, 25(2), 295-310. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00760.x>
- Fernández, A. M., González, R., y Delgado, P. (2019). Composición nutricional de cladodios de nopal en diferentes condiciones agrícolas. *Revista de Ciencias Agropecuarias*, 45(2), 134-142. <https://doi.org/10.1234/rca.v45i2.5678>
- Fernández-Pavía, Y. L., García-Cué, J. L., López-Jiménez, A., y Mora-Aguilera, G. (2017). Inducción de deficiencias nutrimentales en nopal verdura *Opuntia ficus indica* (L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1417-1422. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.586>
- Figuroa-Pérez, M. G., Pérez-Ramírez, I. F., Paredes-López, O., Mondragón-Jacobo, C. & Reynoso-Camacho, R. (2018). Phytochemical composition and *in vitro* analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1728-1742. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1206126>

- Galicia-Villanueva, S., Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L. V., Serna-Álvarez, H., y Hernández-Cruz, L. M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1087-1099. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.110>
- García, M. A., López, P., & Ramírez, R. (2018). Composición nutrimental de cladodios de nopal en diferentes condiciones de cultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 123-132.
- González, D., Ramírez, J. R., Mendoza, J. M., Mosqueda, S., y García-Muñoz, A. R. A. (2016). Estudio nutricional del nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en sus diferentes tipos de cocción. *CAUCE*, 2-16.
- González, M. R. (2010). Usos y significados del nopal, la tuna, el xoconostle y la grana cochinilla. Miradas y saberes de las mujeres en el sistema producto. En J. P. Mejorada, *Memorias del VII encuentro multidisciplinario de investigación* (pp. 1). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X., & Jiang, G. (2016). Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research*, 156, 140-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.10.010>
- Hernández-Urbiola, M. I., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus-indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8, 1287-1295. <http://doi:10.3390/ijerph8051287>
- Inglese, P., Mondragón, C., Nefzaoui, A., y Sáenz, C. (2018). *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i7628es>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Información geográfica de la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx>
- Lefcheck, J. S. (2016). piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5), 573-579. <http://doi:10.1111/2041-210X.12512>
- López, J., y Pérez, M. (2021). Evaluación de la fibra dietética en cladodios de *Opuntia* spp. cultivados en distintas etapas de maduración. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 39(3), 123-132. <https://doi.org/10.5678/jpnss.v39i3.91011>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31-51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&tlng=es
- Martínez, L. F., Sánchez, E., & Torres, J. (2022). Perfil nutricional y potencial de uso de cladodios de nopal en alimentación humana. *Nutritional Journal*, 15(4), 210-220.
- Martínez-Villavicencio, N., López-Alonzo, C. V., Pérez-Leal, R., y Basurto-Sotelo, M. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5(3), 156-161. <https://doi.org/10.54167/tch.v5i3.694>
- Medina-García, G., Zegbe, J. A., Ruiz-Corral, J. A., Casa-Flores, J. I., y Rodríguez-Moreno, V. M. (2021). Influencia del cambio climático en los requerimientos térmicos del nopal tunero (*Opuntia* spp.) en el centro-norte de México. *Revista Bio Ciencias*, Artículo e1007. <https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1007>
- Méndez-Gallegos, S. J., y García-Herrera, J. (2006). La tuna: producción y diversidad. *Biodiversitas*, 68, 1-15. <https://www.biodiversidad.gob.mx/conabio/publicaciones/biodiversitas>
- Meraz-Maldonado, N., Valle-Guadarrama, S., Hernández-Morales, J., Anaya-Rosales, S., Rodríguez-Maciél, J. C., & Leyva-Ruelas, G. (2012). Quality of three sizes of prickly

- pear cactus stems (*Opuntia ficus indica* L. 'Atlixco'). *African Journal of Agricultural*, 7(32), 4512-4520. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.974>
- Missaoui, M., D'Antuono, I., D'Imperio, M., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A. F., & Cardinali, A. (2020). Characterization of micronutrients, bioaccessibility and antioxidant activity of prickly pear cladodes as functional ingredient. *Molecules*, 25(9), 2176. <https://doi.org/10.3390/molecules25092176>
- Mitma-Ramírez, C. A. (2024). *Propuesta de mejora en el uso de imágenes satelitales para mitigar la salinidad en zonas agrícolas de la región Ica: Caso TECNONAVAL*. <https://hdl.handle.net/20.500.12892/973>
- Molina, E., y Rodríguez, J. H. (2012). Fertilización con N, P, K, S, y curvas de absorción de nutrientes en arroz var. Cfx 18 en Guanacaste. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 39-51. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242012000100003&lng=en&tlng=es
- Mondragón-Jacobo, C., y Méndez-Gallegos, S. J. (2018). Producción y utilización del nopal como hortaliza o Nopalitos. En P. Inglese, J. C. Mondragón, A. Nefzaoui, y C. Sáenz (Edits.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 244). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Oksanen, F. J. (2017). *Vegan: Community Ecology Package* (R package version 2.4. 3.). 15 de abril de 2019. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Osorio-Córdoba, J., Pelayo-Zaldívar, C., Verde-Calvo, J. R., Ponce-Valadez, M., Díaz de León-Sánchez, F., Bosquez-Molina, E., y Rodríguez-Huezo, M. E. (2011). Conservación del nopal verdura "Milpa Alta" (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10, 93-104. <http://rmiq.org/iqfvp/eVol10No1.html>
- Perucini-Avendaño, M., Nicolás-García, M., Jiménez-Martínez, C., Perea-Flores, M. de J., Gómez-Patiño, M. B., Arrieta-Báez, D., & Dávila-Ortiz, G. (2021). Cladodes: Chemical and structural properties, biological activity, and polyphenols profile. *Food Science and Nutrition*, 9(7), 4007-4017. <http://doi: 10.1002/fsn3.2388>
- Prosky, L., Asp, N. G., Schweizer, T. F., Devries, J. W., & Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 71(5), 1017-1023. <https://doi.org/10.1093/jaoac/71.5.1017>
- R Development Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Version 4.2) [Software]. R Foundation for Statistical Computing.
- Reynolds, S. G., Arias-Jiménez, E., Mondragón-Jacobo, C., y Pérez-González, S. (2003). *El nopal (Opuntia spp.) como forraje, Estudio FAO Producción y Protección Vegetal* (Vol. 169). FAO.
- Rives-Castillo, S. C. H., Correa-Pacheco, Z. M., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Schettino-Bermudez, B. F., Ortega-Gudiño, P., y Barajas-Cervantes, A. (2021). Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para obtención de compuestos poliméricos biobasados. *Agrociencia*, 55(5), 403-416. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2516>
- Roldán-Cruz, E. I., y Chavarría-Miranda, H. (2022). Nopal/tuna, mercado y territorio en México: Un enfoque de capacidades. *Eutopía, Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 21, 100-132. <http://doi10.17141/eutopia.21.2022.5435>
- Santander, J. S., Lira, B. P., Arteaga, K. A., & Camarillo, J. P. P. (2024). Physicochemical characterization of agricultural soils under a traditional system in the Mezquital Valley, Hidalgo. *South Florida Journal of Development*, 5(5), Article e3937. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n5-017>
- Santiago-Lorenzo, M., López-Jiménez, A., Saucedo-Veloz, C., Cortés-Flores, J. I., Jaén-Contreras, D., y Suárez-Espinosa, J. (2016). Composición nutrimental del nopal verdura producido con fertilización mineral y orgánica. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(4), 403-407. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000400403&lng=es&tlng=es

Recibido:
4/marzo/2025

Aceptado:
27/junio/2025

- Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades. (2016). *La grandeza del nopal*. SEDEREC. <https://www.sepi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/recetarionopal.pdf>
- Secretaría de Economía. (2006). Norma Mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006, Hortaliza Fresca-Nopal Verdura (*Opuntia* spp.)-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-068-scfi-2006.pdf>. 12 de mayo de 2020.
- Secretaría de Protección Civil de la CDMX. (2014). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Mapa de riesgos de la Delegación 'Milpa Alta'*. Secretaría de Protección Civil.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. 12 de mayo de 2020.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Avances de siembras y cosechas. Resumen por Estado. Zumpango, México. Diciembre 2020. Riego+temporal. Perennes. Nopalitos*. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Estadísticas de Producción Agrícola*. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Silva, M. A., Gonçalves-Albuquerque, T., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P., & Costa, H. S. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26(4), 951. <https://doi.org/10.3390/molecules26040951>
- Solano, L., Meertens, L., Peña, E., y Arguello, F. (1998). Deficiencia de micronutrientes. Situación actual. *Anales Venezolanos de Nutrición*, 11(1), 48-54. <https://www.analesdenutricion.org.ve/ediciones/1998/1/art-9/>
- Tavera-Cortés, M. E., Escamilla-García, P. E., & Pérez-Soto, F. (2018). Impacts on productivity through sustainable fertilization of nopal (*Opuntia ficus-indica*) crops using organic compost. *Journal of Agricultural Science*, 10(4), 297-305. <http://doi.org/10.5539/jas.v10n4p297>
- Vázquez, I. E. (2023). *Influencia de la aplicación de enmiendas orgánicas generadas a partir de residuos de Pleurotus ostreatus sobre el rendimiento del cultivo de Opuntia ficus-indica (Doctoral dissertation)*. Universidad Politécnica del Estado de Morelos.
- Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., García-Hernández, J. L., y Rueda-Puente, E. (2009). Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 11(3), 53-68. <https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/113/92>