



Determinación de la fertilidad del suelo mediante un sistema de información geográfica en el municipio Falcón de la Península de Paraguaná, Venezuela

José Pastor Mogollón

Fundación CIEPE
División Control de Aguas Evaluación
y Tratamiento de Residuos Agroindustriales
(CAETRA)-Yaracuy
Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado
(UCLA)
Decanato de Agronomía, Departamento de
Química y Suelos- Lara
ORCID: 0000-0002-0553-4170
email: jmogollon15@gmail.com
Venezuela

Wilder Rivas

Universidad de los Andes (ULA)
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Departamento de Ordenación de Cuencas
Hidrográficas
ORCID: 0000-0003-4947-6213
email: wilderrivas@yahoo.com
Mérida - Venezuela

Fecha de recepción: 12/04/2021

Fecha de aprobación: 25/06/2021

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo determinar un índice de fertilidad química (IFQ) en los suelos del municipio Falcón en la Península de Paraguaná, a partir de la implementación de un sistema de información geográfica (SIG). Se realizó un muestreo sistemático de suelos, colectándose 395 muestras a una profundidad de 0-20 cm. Se generaron mapas para cada una de las propiedades relacionadas a la fertilidad, así como el mapa final del IFQ a escala 1:50.000. Las reservas (Kg/ha) de Potasio (K) fueron altas en los suelos de todo el municipio. Para el Fósforo disponible (Pd) los valores más altos se encontraron en el área de mayor influencia agrícola. El Nitrógeno disponible (Nd) es bajo en toda la zona, salvo algunos parches muy pequeños asociados a

microclimas puntuales que generan acumulación de materia orgánica. Los suelos presentan diferentes niveles de pH; un 50 % de la superficie presenta suelos neutros (pH de 6,5-7,5) y el otro 50% suelos alcalinos (pH > 7,5). El IFQ reflejó que un 60 % de la superficie (1050 Km²) presenta baja fertilidad química y un 40 % de la superficie (712 Km²) suelos que van de mediana a alta fertilidad. A pesar de que una gran superficie de suelos del municipio Falcón presentan una alta fertilidad potencial, es importante considerar la poca disponibilidad hídrica, tanto en cantidad como en calidad en las zonas áridas, lo cual implica que la principal limitación para la producción agrícola vendría dada por la baja disponibilidad de agua en la zona.

Palabras clave:

Fertilidad de suelos; índice de fertilidad; sistema de información geográfico; geoestadística



Determination of soil fertility through a geographic information system in the Falcon municipality of the Paraguana Peninsula, Venezuela

Abstract

The objective of this work was to determine a chemical fertility index (CFI) in the soils of the Falcon municipality in the Paraguana Peninsula, based on the implementation of a geographic information system (GIS). A systematic soil sampling was carried out, collecting 395 samples at a depth of 0-20 cm. Maps were generated for each of the fertility-related properties, as well as the final CFI map at 1: 50,000 scale. The reserves (Kg/ha) of Potassium (K) were high in the soils of the entire municipality. For available Phosphorus (Pd) the highest values were found in the area of greatest agricultural influence. Available Nitrogen (Nd) is low throughout the area, except for some very small patches associated with specific

microclimates that generate accumulation of organic matter. Soils have different pH levels; 50% of the surface has neutral soils (pH 6.5-7.5) and the other 50 %, alkaline soils (pH > 7.5). The IFQ reflected that 60 % of the surface (1050 Km²) has low chemical fertility; and 40 % of the surface (712 Km²) soils ranging from medium to high fertility. Despite the fact that a large area of soils in the Falcón municipality has a high potential fertility, it is important to consider the low availability of water, both in quantity and quality in arid zones, which implies that the main limitation for agricultural production would be given due to the low availability of water in the area.

Key words:

Soil fertility; fertility index; geographic information system; geostatistic



Introducción

La fertilidad del suelo y las implicaciones que tiene este concepto resulta muy importante para la supervivencia de la raza humana en nuestro planeta, lo cual se relaciona al hecho de que las especies vegetales utilizadas como cultivos agrícolas transforman el agua y los nutrientes que existen en el suelo en carbohidratos, grasas y proteínas. Se plantea entonces que mientras más fértiles sean los suelos, mayor será la cantidad de alimento o fibra que la planta producirá (Havlin y Heiniger, 2020).

En este sentido, se propone que el concepto general de suelo fértil se refiere más bien a sus propiedades químicas, específicamente a la disponibilidad de los macroelementos primarios Nitrógeno, Fósforo y Potasio (N, P, y K), así como el valor de pH que regula la disponibilidad de las formas solubles de nutrientes (Wall y Plunkett, 2020). La mayoría de los nutrimentos requeridos en cantidades relativamente grandes se encuentran disponibles para los cultivos cuando el pH se encuentra cercano a la neutralidad (Rosas-Patiño et al., 2017).

Aunado a lo anteriormente expuesto, cuando se habla del análisis de fertilidad de suelo se hace referencia al procedimiento por el cual se miden las reservas de nutrientes esenciales que tiene el mismo y a la capacidad que tiene

el suelo de facilitarlos a las plantas, lo cual puede proporcionar a los investigadores y agricultores una base precisa y confiable para que puedan tomar decisiones apropiadas respecto a las enmiendas y fórmulas de fertilización que requieran sus experimentos o parcelas (Whetton et al., 2021).

Desde el punto de vista económico, la importancia de los planes de fertilización del suelo radica en los costos que esto implica. Estudios realizados al respecto han permitido establecer que estos representan entre un 45 a 60 % del costo total de producción de los sistemas agrícolas, lo que es alto considerando la gran importancia en el rendimiento y en la calidad que trae consigo una buena fertilización (Cahyono et al., 2020). De tal manera, cobra vital importancia el conocimiento de las necesidades o requerimientos nutricionales de los cultivos con que se estará trabajando en una determinada zona, y el contenido de nutrientes en el suelo, a objeto de elaborar de manera eficiente un buen programa de fertilización.

En años recientes se ha planteado el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis espacial de la fertilidad del suelo, a partir de la interpolación de variables relacionadas con la fertilidad, utilizando para ello diversos métodos como la Ponderación del

Inverso de la Distancia (IDW por sus siglas en inglés), y *kriging* que es un método geoestadístico que cuantifica la estructura espacial de los datos y su autocorrelación mediante variogramas para realizar las predicciones correspondientes (Biradar et al., 2020).

Hasta ahora en Venezuela no existe información a una escala adecuada que permita a los diferentes organismos o personas en general, públicos y privados, acceder a una fuente de información para la toma de decisiones en el requerimiento de fertilización de los cultivos. Tampoco se tiene cuantificado ni localizado geográficamente los niveles de fertilidad en el territorio a una escala detallada. La generación de información en este campo permitiría planificar mejor el uso del suelo y mejorar el rendimiento de las plantaciones a partir de la zonificación agrícola de las mismas.

En el marco de este contexto, el objetivo principal del estudio fue la determinación de un índice de fertilidad química en suelos del municipio Falcón de la Península de Paraguaná, a partir de la implementación de un sistema de información geográfica que permita el manejo del recurso suelo con el fin de mejorar la productividad de los principales cultivos en la zona.

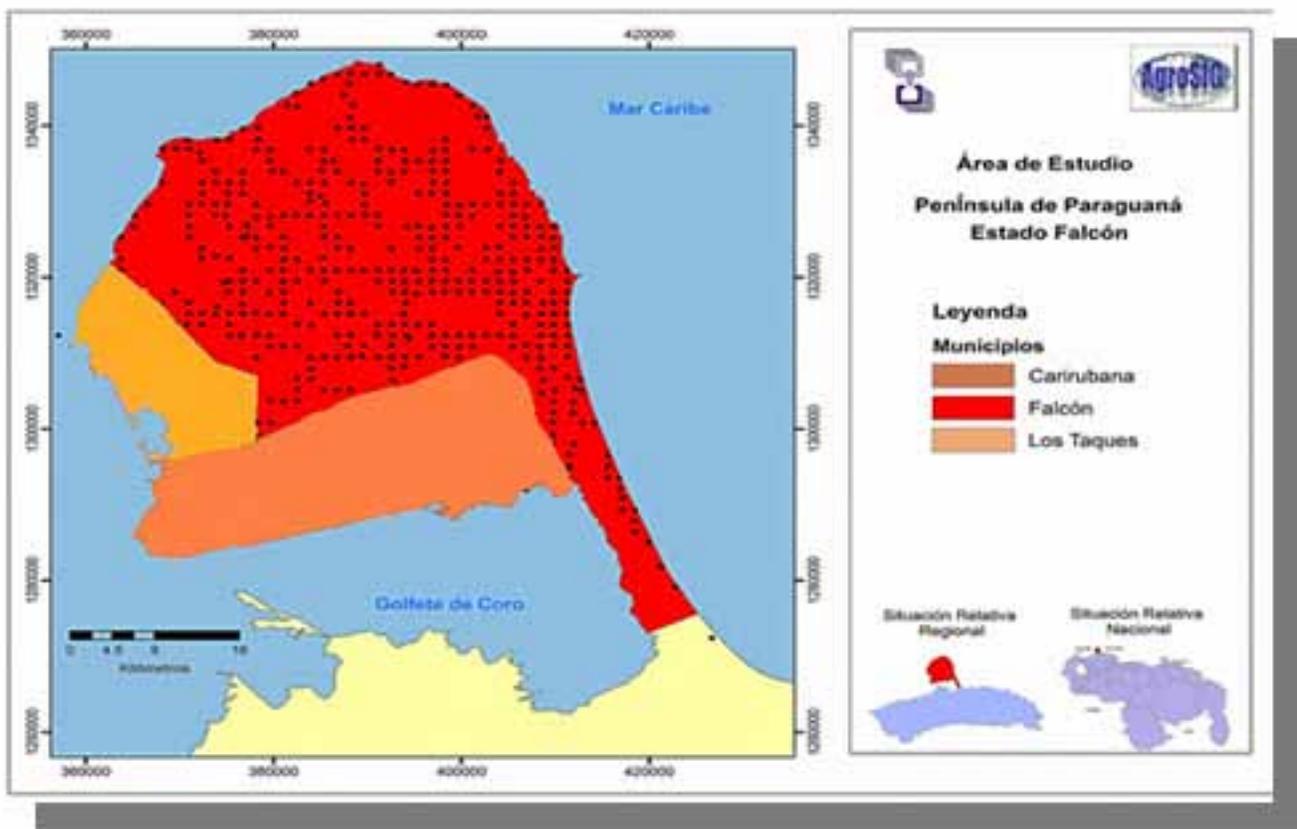


Metodología

Área de estudio

El municipio Falcón (**Figura 1**) es uno de los 25 municipios que integran el estado Falcón en Venezuela; tiene una población de 54.230 habitantes (INE, 2013). Su capital es Pueblo Nuevo. Se encuentra ubicado al noreste de la Península de Paraguaná y ocupa un área de 1.577 km².

Figura 1. Distribución espacial de los sitios de muestreo.



Fuente: Elaboración propia, (2021), a partir del trabajo de Mogollón et al., (2015b).

Clima: La zona se caracteriza por presentar precipitaciones medias anuales que oscilan entre los 200 mm y 400 mm y evaporaciones medias anuales entre los 2.700 mm y 3.300 mm, condición que la ubica en un clima árido a hiperárido

con un marcado déficit hídrico a lo largo del año. Posee un régimen pluviométrico unimodal con un periodo lluvioso que va desde el mes de septiembre al mes de diciembre, con máximas en noviembre (Rivas y Mogollón, 2015a).

Vegetación: La vegetación comprende un conjunto de grupos estructurales primarios diferenciados por la forma de vida dominante: arbustal, matorral (árboles de altura inferior a 5m), cardonal, bosque (dominados por



árboles de más de 5m) de uno o dos estratos. Aún dentro de un mismo grupo, la arquitectura de la comunidad varía dependiendo de su cobertura total, si es desértica, rala o densa (Matteucci, 1987). Particularmente, en el municipio Falcón predominan las comunidades vegetales de cardonales, arbustales y matorrales dominados por las especies *Stenocereus griseus*, *Prosopis juliflora*, *Castela erecta*, *Caesalpinia coriaria* y *Crotón flavens* (Mogollón et al., 2016).

Suelos: Los suelos que predominan en la Península de Paraguaná corresponden a los órdenes Entisoles y Aridisoles, siendo los subórdenes más importantes Orthents, Orthids, Torriorthents, Camborthids, y Calciorthids (Mogollón et al., 2015a).

Uso de la Tierra: En la Península de Paraguaná se han identificado seis (06) principales tipos de Uso de la Tierra, de los cuales la vegetación natural representó el 76,65 % del área total de la Península, seguida de un 12,36 % que se encontró bajo condición de áreas descubiertas. Las áreas inundables y artificiales ocuparon 4,83 % y 3,20 % del territorio, respectivamente, seguida de las áreas cultivadas con 2,87 % de ocupación (Rivas y Mogollón, 2015b). Con respecto a las áreas potencialmente cultivables,

estas se ubican fundamentalmente en el municipio Falcón, ocupando un total de 619,85 km² que corresponde a un 23% del total de la superficie de la Península de Paraguaná. Los principales cultivos desarrollados en esta zona corresponden a los siguientes: melón (*Cucumis melo*); sábila (*Aloe vera*); maíz (*Zea mays*) generalmente asociado a caraota o yuca y en menor proporción, patilla (*Citrus lanatus*), cebolla (*Allium cepa*) (Fernández et al., 2011).

Muestreo de Suelos: El muestreo fue realizado en todo el municipio Falcón de manera sistemática (a partir de una malla o red), con una intensidad de muestras cada 4 km² (Mogollón et al., 2015b), para un total aproximado de 395 puntos de muestreo (Figura 1). Esto permitió generar mapas para cada una de las propiedades relacionadas a la fertilidad, así como el mapa final del índice de fertilidad a escala de 1:50.000. Las muestras fueron colectadas a una profundidad de 0-25 cm que corresponde a la capa arable del suelo, donde se supone está concentrada gran parte de la fertilidad del mismo.

Indicadores de Fertilidad Química: Se determinó la fertilidad química del suelo con cuatro indicadores: Nitrógeno amoniacal ($\mu\text{g g}^{-1}$), Fósforo disponible

(mg kg^{-1}), Potasio intercambiable (cmol kg^{-1}). Además fue considerado el pH, en vista de que existe una alta correlación entre esta variable y la disponibilidad de nutrientes del suelo (Neina, 2019).

● **Nitrógeno Amoniacal ($\mu\text{g NH}_4 \text{ g}^{-1}$):** El NH_4^+ intercambiable se estimó mediante una extracción previa con KCl 1M y una posterior medición en el extracto, mediante el método de azul de indofenol (Mulvaney, 1996).

● **Fósforo Disponible:** El Fósforo disponible (Pd) fue extraído por el método de Olsen, mediante una solución de Bicarbonato de Sodio (NaHCO_3) 0,5 M a pH 8,5. Posteriormente el P se determinó colorimétricamente por espectrofotometría, usando el método del complejo azul de molibdato (Kuo, 1996).

● **Potasio cambiante (K^+):** El potasio cambiante del suelo fue extraído con acetato de amonio 1N a pH 7, según el método descrito por Thomas (1982). Posteriormente, se determinó el catión K^+ por fotometría de llama (Helmke y Sparks, 1996).

● **pH del suelo:** Se determinó usando el método potenciométrico a través de un electrodo de vidrio con un electrodo de refe-



rencia de calomel, en una relación suelo:agua de 1:2 (Thomas, 1996).

- Densidad Aparente:** Fue determinada a partir del método de Uhland tomando muestras no disturbadas en el campo, a la profundidad de 25 cm, según la metodología propuesta por Grossman y Reinsch (2002). Esta variable permitió convertir las unidades de concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$, mg kg^{-1} , cmol kg^{-1}) de los diferentes nutrientes evaluados, a reservas (kg ha^{-1}) en el suelo, partiendo de la fórmula de cálculo de peso de una hectárea de terreno (Peso hectárea = Densidad Aparente x Volumen) (Gabriels y Lobo, 2006).

Interpretación de los valores de cada variable con fines de fertilidad: Esta fase tuvo como fin la determinación de regiones calificadas cualitativamente, con base

a tablas guías, determinadas por rangos cuantitativos sobre los niveles altos, moderados o deficientes en los suelos para cada variable química (Dalence, 2003). En base a esto se construyó la Tabla 1 que muestra los valores referenciales para los suelos evaluados.

Creación de mapas temáticos: Para la elaboración de los mapas temáticos asociados a cada uno de los indicadores de suelos, se utilizó la herramienta de análisis geoestadístico del sistema de información geográfico. Se aplicó el método de interpolación cokriging, que consiste en hacer la predicción espacial de una variable con base en su información y en algunas variables auxiliares que estén correlacionadas espacialmente con ella (Henríquez et al., 2013).

En este caso, el *cokriging* permitió gracias a la correlación de las variables (interés y auxiliares) obtener una disminución de la varianza de predicción en comparación con el método de interpolación *kriging*. Para cuantificar el grado y escala de variación espacial se utilizaron diversos modelos teóricos, que para cada caso fueron seleccionados a partir de una validación cruzada (Gallardo, 2006), la cual compara el valor real medido con uno estimado en el mismo punto, es decir calcula el error de estimación o residuo. Se consideró como el modelo de mejor ajuste, al variograma teórico cuya media de los residuos fuese más cercana a cero (Mogollón et al., 2015a). Se utilizó para ello la herramienta de análisis geoestadístico del software ArcMap 10, el cual permitió el ajuste automatizado de diferentes modelos teóricos de semivarianza.

Tabla 1. Valores referenciales de los niveles de Nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+ ; $\mu\text{g g}^{-1}$), Fósforo disponible (P_2O_5 ; mg kg^{-1}) y Potasio (K) (cmol kg^{-1}) para los suelos evaluados.

Nutrientes evaluados						
Nivel	NH_4^+ ($\mu\text{g g}^{-1}$)	NH_4^+ (kg ha^{-1})	P (mg kg^{-1})	P_2O_5 (kg ha^{-1})	K (cmol kg^{-1})	K_2O (kg ha^{-1})
Bajo	< 27	< 100	< 5	< 43	< 0,16	< 281
Medio	27 -41	100 – 150	5 – 15	43 - 129	0,16-0,38	281 - 667
Alto	> 41	> 150	> 15	> 129	> 0,38	> 667

Fuente: Elaboración propia, (2021).

Nota: (Los valores en kg/ha fueron calculados en base a una profundidad de 0-25 cm y densidad aparente de $1,50 \text{ tn ha}^{-1}$, como valores promedio para los suelos muestreados en este estudio).



Generación del índice de fertilidad químico integrado: Para calcular el índice de fertilidad químico del suelo (IFQ) se aplicó la media geométrica ingresando los valores referenciales de fertilidad de cada uno de los parámetros químicos mencionados anteriormente, a partir de una modificación de la metodología propuesta inicialmente por Kosmas et al. (1999) para estimar la calidad del suelo.

$$IFQ = (N * P * K * pH^*)^{1/4}$$

Luego se elaboró a partir del rango de valores obtenidos del IFQS, la valoración integral de la fertilidad del suelo.

Resultados

En la Tabla 2 se presenta para cada variable experimental, el modelo de mejor ajuste a partir de los resultados de la varianza cruzada, la cual compara el valor real medido con uno medido en el mismo punto, calculando el error (ϵ) de

estimación (residuo), según la siguiente fórmula:

$$\epsilon = Z^0_a - Z_a$$

Donde Z^0_a es el valor estimado en el punto a, mientras que Z_a es el valor medido en el mismo punto. El variograma teórico cuya media de los residuos sea más cercana a cero, se considera como el modelo de mejor ajuste (Garbanzo-León et al., 2017).

Tabla 2. Modelo de ajuste teórico para las variables estudiadas.

Variable	Modelo	Media residuos*	Error cuadrático estándar
NH ₄ ⁺	Efecto de hoyo	1,788	0,93
P ₂ O ₅	J-Bessel	6,906	0,58
K ⁺	Tetraesférico	-0,106	1,88
Ph	Exponencial	-0,005	0,96

Fuente: Elaboración propia, (2021).

*Error de estimación: valor estimado – valor medido.

Nitrógeno disponible (Nd)

En la **Figura 2** se muestra la distribución espacial del Nitrógeno disponible (medido como NH₄⁺). De manera general se puede observar que el Nitrógeno es un elemento que se encuentra en muy bajos niveles en los suelos del

municipio Falcón. De esta manera, se considera que es un elemento limitante para los posibles cultivos que se puedan establecer en esta zona.

En la **Tabla 3** se presentan las áreas con los diferentes niveles de Nitrógeno disponible en el suelo.

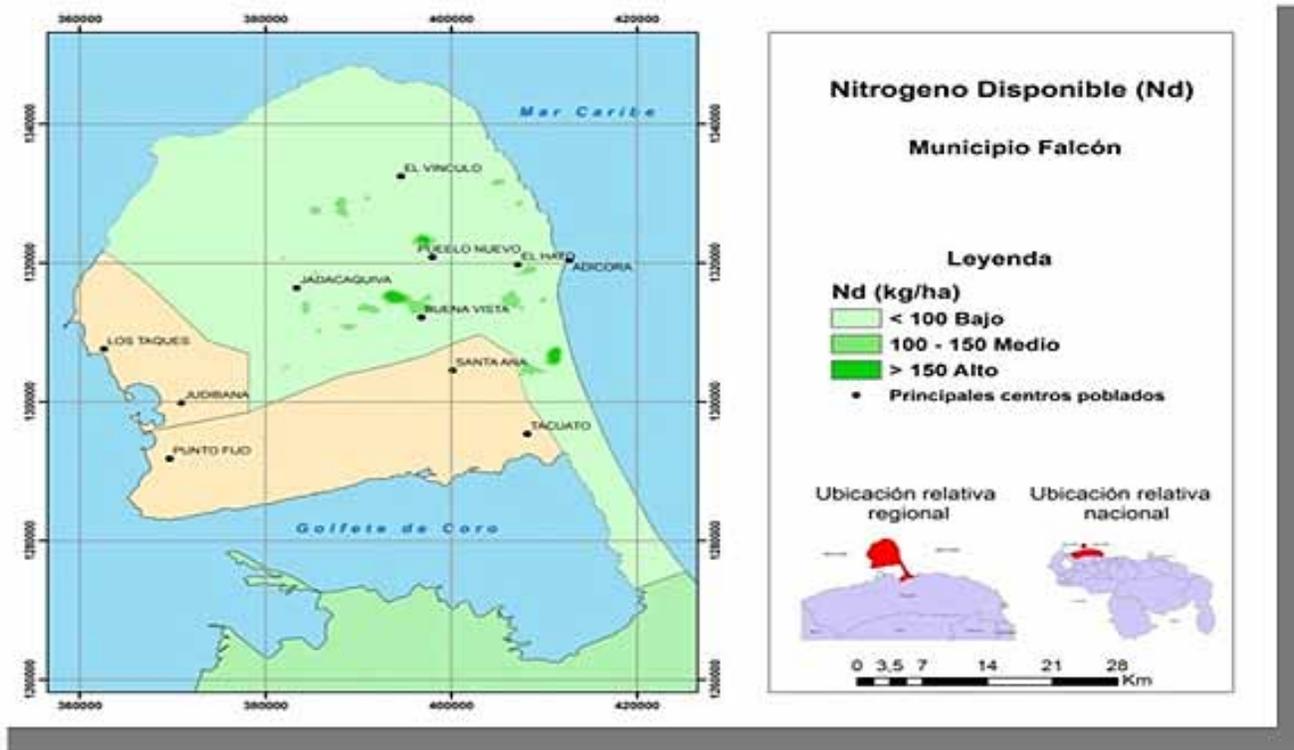
En un área de 172.668 hectáreas que representan el 97,94 % de la superficie de suelos del municipio existen niveles bajos de Nd (por debajo de 100 kg/ha). Y apenas 2,05 % de la superficie presenta valores de medios a altos.



El Nitrógeno disponible en el suelo es dependiente de su mineralización la cual es afectada por factores ambientales físicos como temperatura, humedad y aireación, por el contenido de Nitrógeno del sustrato, tipo de compuestos orgánicos y por los microorganismos

del suelo (Verhulst et al., 2015). En zonas áridas la actividad microbiana es frecuentemente limitada por la humedad, por lo que la tasa de mineralización e inmovilización de nitrógeno están ligadas a los pulsos de precipitación (Celaya y Castellanos, 2011).

Figura 2. Distribución espacial del Nitrógeno disponible en los suelos del municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).

También la mineralización de Nitrógeno en zonas áridas es afectada por la disponibilidad de Carbono y Nitrógeno y la calidad de la materia orgánica, dado que la lignina regula la cantidad y la velocidad de mineralización de este elemento químico (Hernández et al., 2007). Debido a esto, la canti-

dad en general del Nitrógeno en el municipio Falcón tiende a ser bajo y las islas de altas concentraciones pueden estar asociadas a efectos antrópicos de aplicación de fertilizantes o zonas naturales con vegetación alta de árboles y arbustos que generan microclimas propicios para que existan bue-

nas cantidades de este nutriente (Aponte et al., 2011). Dado que el Nitrógeno es el segundo factor limitante en la producción de alimentos luego del agua, este debe ser considerado en la elaboración de planes de fertilización en suelos del municipio Falcón, ya que se considera como un nutriente

potencialmente limitante para la actividad agrícola.

Fósforo disponible (P disp.)

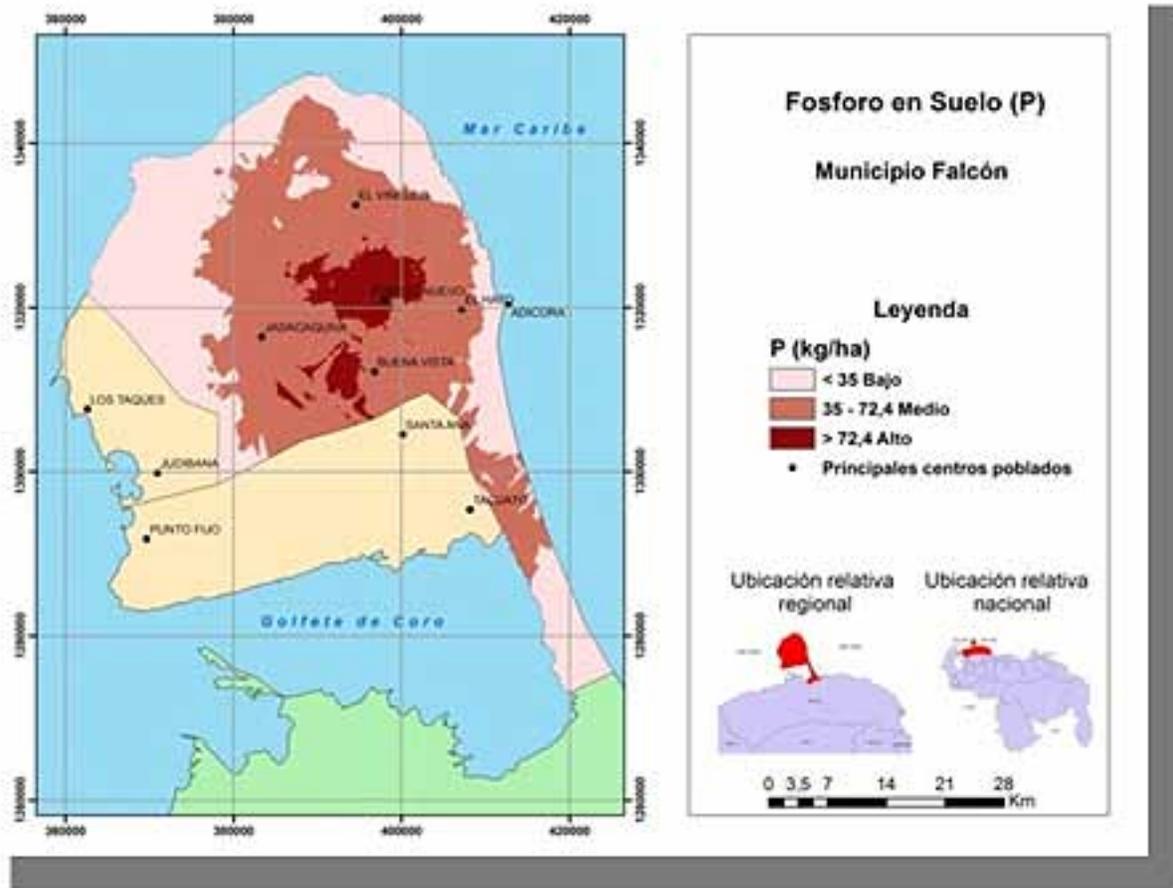
En la Figura 3 se muestra la distribución espacial del Fósforo disponible. De manera general

se puede observar que existe un gradiente en la concentración de este elemento, encontrándose altos niveles de Fósforo en las zonas céntricas del municipio Falcón, y disminuyendo hacia la periferia.

En la **Tabla 3** se presentan las áreas con los diferentes niveles de

Fósforo disponible en el suelo. En un área de 163.918 hectáreas correspondiente a un 92,96 % de la superficie de suelos del municipio existen niveles que van de medios a bajos (por debajo de 72,4 kg/ha). Y sólo un 7,04 % de la superficie presenta valores altos.

Figura 3. Distribución espacial del Fósforo disponible en los suelos del municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).

En los ecosistemas ubicados en zonas áridas la escasez de agua provoca un desacoplamiento en los ciclos de varios elementos. A medida que aumenta la aridez, se reduce la cantidad de Carbono (C) y Nitrógeno (N) disponibles en el suelo, mientras que la de Fósforo (P) aumenta. Ello se debe a la alteración de los procesos biológicos debido a la poca disponibilidad de agua que reducen los valores de C y N, así como a la intensificación de los procesos abióticos como la meteorización de las rocas que mejoran la disponibilidad de P debido a que hay menos plantas para absorber este nutriente, tal como lo señalan Delgado-Baquerizo et al. (2013).

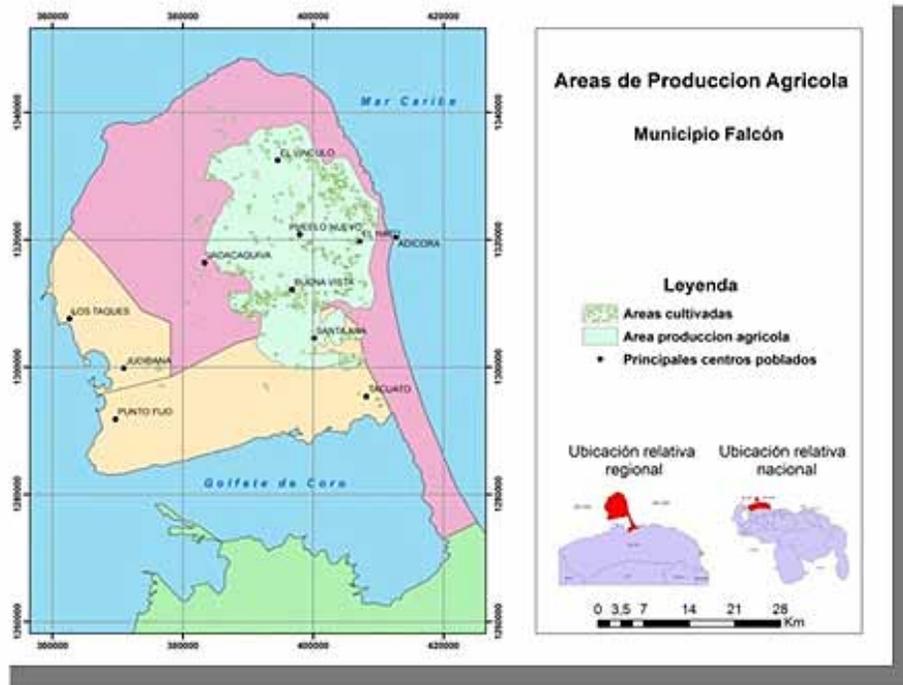
La distribución del P observado en el área de estudio, puede estar

relacionada al uso de fertilizantes fosfatados en actividades agrícolas; ya que las regiones que tienen más altas concentraciones de este elemento corresponden a las zonas con mayor uso agrícola en la Península de Paraguaná. En la Figura 4 podemos apreciar la correlación que existe entre el mapa de distribución espacial de las áreas agrícolas del municipio Falcón, con el mapa de distribución del Fósforo disponible, lo que hace deducir el comportamiento de este nutriente en el área de estudio.

En virtud de lo anterior, se podría estar observando el vestigio de las prácticas de fertilización en el área, producto de la aplicación de fertilizantes fosfatados por parte de los productores agrícolas de la zona. Es importante considerar

que el contenido de P disponible en el suelo, es una variable dinámica, fuertemente influenciada por las propiedades del suelo, la planta y las condiciones ambientales (Kassai y Tóth, 2020). Uno de los factores que estarían condicionando la disponibilidad de P en el área de estudio, es el pH de suelo. El óptimo rango de pH del suelo dentro del cual se observa la máxima disponibilidad de P se encuentra entre 6,5 y 7,5. Pasado cierto nivel de pH alcalino (sobre 7,5 que es la condición predominante en los suelos de la Península de Paraguaná) comienzan a precipitar ciertas formas de fosfatos de calcio, lo cual reduce la disponibilidad del Fósforo.

Figura 4. Distribución espacial de las áreas agrícolas en el municipio Falcón.



Fuente:
Elaboración propia, (2021).



Tabla 3. Áreas correspondientes a los diferentes niveles de Nitrógeno disponible (Nd), Fósforo disponible (P) y Potasio disponible (K) en el municipio Falcón.

Nitrógeno (kg/ha)	Superficie (ha)	% de la superficie
Bajo	172.668	97,94
Medio	3.033	1,72
Alto	597	0,33
Fósforo (kg/ha)	Superficie (ha)	% de la superficie
Bajo	74.170	42,06
Medio	89.748	50,90
Alto	12.380	7,04
Potasio (kg/ha)	Superficie (ha)	% de la superficie
Bajo	33.698	19,11
Medio	67.600	38,34
Alto	75.000	42,54

Fuente: Elaboración propia, (2021).

Potasio intercambiable (K+)

En la **Figura 5** se muestra la distribución espacial del Potasio intercambiable. De manera general se puede observar que el Potasio es un elemento que se encuentra en altos niveles en los suelos del municipio Falcón. Debido a esto se podría deducir que no se requeriría de una fertilización a base de Potasio para suplir los re-

querimientos de los cultivos si se está empezando a producir sobre un terreno natural.

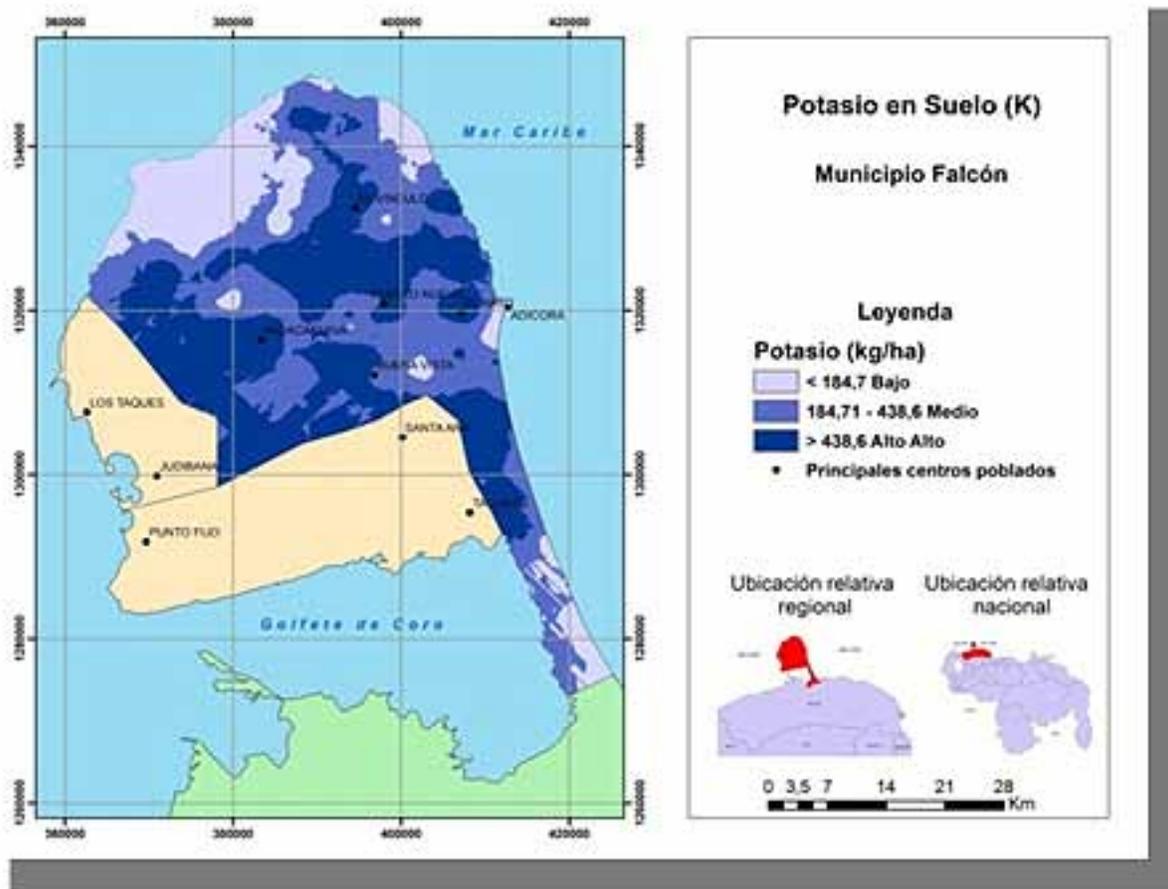
En la **Tabla 3** se presentan las áreas con los diferentes niveles de Potasio intercambiable en el suelo. En un área de 142.600 hectáreas correspondiente a un 80,88 % de la superficie de suelos del municipio existen niveles altos a medios (por encima los 184,7 kg/ha). Y un 19,11

% pequeño pero apreciable de la superficie presenta valores bajos.

El hecho de que gran parte de los suelos del municipio Falcón presenten niveles que van de medios a altos de K, está relacionado a que en zonas áridas el lavado de este nutriente es casi nulo debido a las escasas precipitaciones lo cual ha sido reportado por Torres et al. (2017).



Figura 5. Distribución espacial del Potasio disponible (K) en los suelos del municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).

Por otra parte, los suelos de zonas secas presentan altos contenidos de K, el cual se deriva fundamentalmente del material parental; aunque el proceso de intemperización es lento en estas localidades, los minerales primarios y secundarios liberan el Potasio hidrosoluble e intercambiable, que puede ser aprovechado por las plantas o mantenerse en los sitios de intercambio de los coloides del suelo (Römheld y Kirkby, 2010).

De manera general se plantea que la fertilización con Potasio es mucho menos importante en zonas con climas áridos debido a la abundancia de este elemento en el suelo. Sin embargo, es recomendable que las fincas que hayan estado produciendo por largo tiempo y donde se aplique riego, se realice la fertilización con Potasio a bajas cantidades para suplir el que se ha lixiviado y cubrir los requerimientos de los principales cultivos esta-

blecidos en la zona. En tal sentido, podría señalarse que los suelos con potencial agrícola de la Península de Paraguaná se consideran, en general, bien abastecidos de Potasio aprovechable. Los valores encontrados en este estudio demuestran que no se requiere de la fertilización potásica en los cultivos básicos tradicionalmente desarrollados en los suelos agrícolas del municipio Falcón.

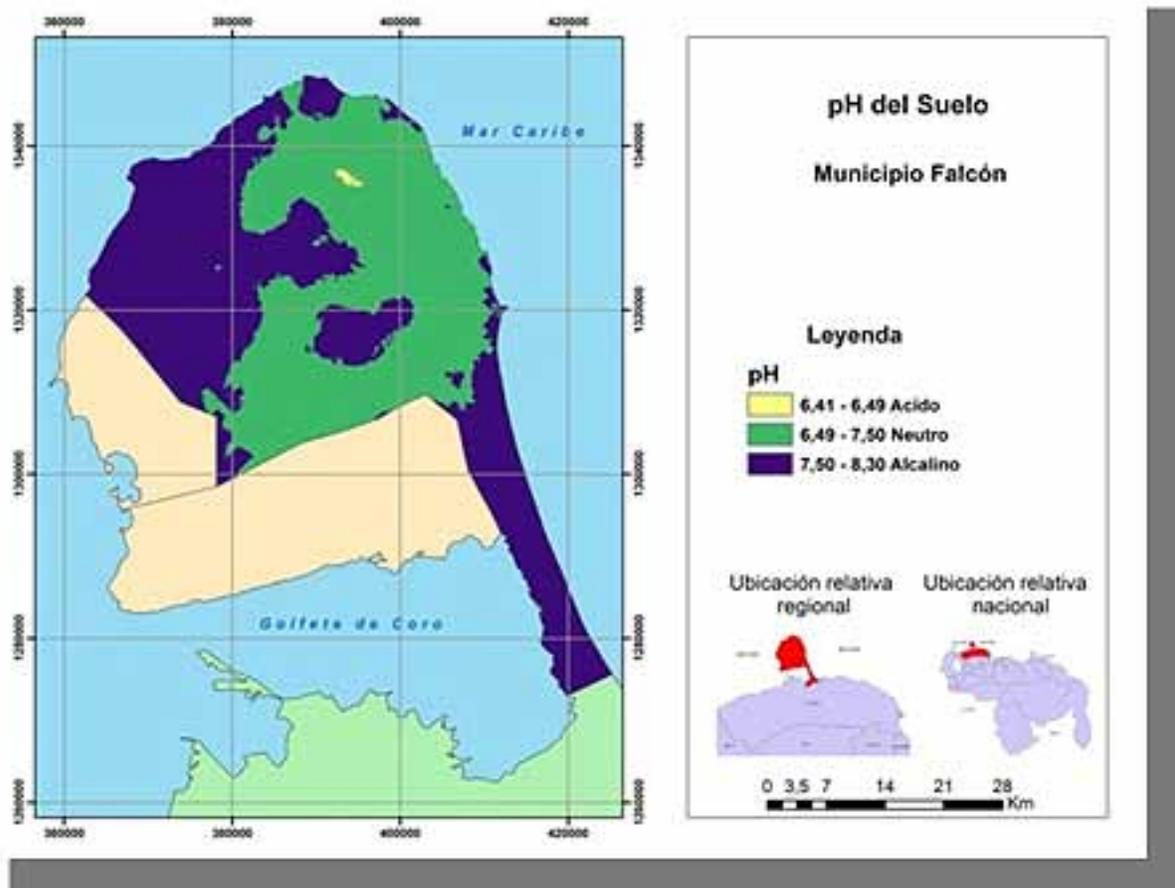
pH del suelo

El pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. En los suelos el pH es una propiedad química de mucha importancia porque indica que tan ácida o alcalina es la solución del

suelo, que es donde las raíces y los microorganismos del suelo toman sus nutrientes (Tsai y Schmidt, 2021). Y como señalan Porta et al. (2003) es un indicativo de las condiciones generales de fertilidad del suelo. En la Figura 6 se muestra la distribución espacial del pH en el suelo. De manera general se

puede observar que el pH del suelo tiende a distribuirse entre suelos neutros y alcalinos en el municipio Falcón. Los suelos de pH neutros se ubican desde el centro hacia la zona oriental de la península de Paraguaná. Y los suelos alcalinos hacia el occidente de la misma, y en el Istmo.

Figura 6. Distribución espacial del pH en los suelos del municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).

En la **Tabla 4** se pueden observar las áreas con los diferentes niveles de pH en el suelo. En un área de 90.523 hectáreas correspondiente a un 51,34 % de la superficie de suelos del municipio son de tipo alcalinos, un área apreciable de 85.490 hectáreas 48,49 % del área total son suelos neutros y solo en una pequeña superficie, equivalente al 0,17 % del área total del municipio Falcón los suelos presentan tendencia a la reacción

ácida, con valores de pH entre 6,41 y 6,49.

Valores de pH alto en la solución del suelo tienen un efecto significativo sobre la mayoría de los cultivos. En la mayoría de los casos, las plantas que crecen en suelos alcalinos son afectadas primariamente por problemas de disponibilidad de nutrientes. Esto debido a que a medida que el pH del suelo aumenta, la solubilidad de

muchos nutrientes se reduce. Consecuentemente, estos nutrientes precipitan como sales u otros compuestos sólidos que las plantas no pueden utilizar tal como ha sido señalado por Casanova (2005). De manera general, se podría indicar que la disponibilidad de todos los nutrientes de la planta está controlada por el pH del suelo, y los mismos son mayormente solubles cuando el rango del pH esta entre 6,5 a 7,5 (Jaramillo, 2002).

Tabla 4. Áreas correspondientes a los diferentes niveles de pH en el suelo en el municipio Falcón.

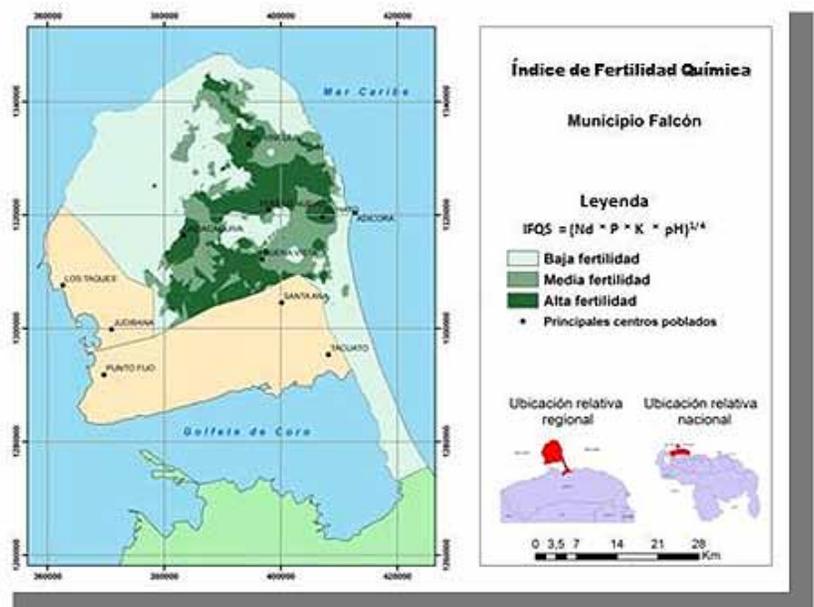
pH del Suelo	Superficie (ha)	% de la superficie
Acido	285	0,17
Neutro	85.490	48,49
Alcalino	90.523	51,34

Fuente: Elaboración propia, (2021).

Índice de fertilidad químico del suelo (IFQ)

En la Figura 7 se observa el mapa del índice de fertilidad químico integral de los suelos del municipio Falcón. A partir de la herramienta álgebra de mapas del sistema de información geográfica, se hizo el cálculo de este mapa integrando las variables N, P, K, y pH del suelo. La distribución espacial del IFQ indica que la fertilidad en el municipio es baja hacia la zona nor-occidental y en el Istmo de la península de Paraguaná. De igual manera, se aprecia que la fertilidad presenta una tendencia de media a alta fertilidad hacia el centro del municipio Falcón.

Figura 7. Distribución espacial del índice de fertilidad química del suelo (IFQ) en el municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).



En la **Tabla 5** se presentan las áreas con los diferentes niveles de fertilidad química del suelo. En un área de 105.013 hectáreas correspondiente a un 59,56 % de la superficie de suelos del municipio existen niveles bajos de fertilidad y un 40,42 % corresponde a valores medios y altos de fertilidad de suelo. Con un total de 71.285 hectáreas de tierra fértil de manera natural.

La mayoría de los suelos ubicados en las regiones áridas y semiáridas a nivel mundial tienen un alto potencial de fertilidad si son irrigados y se mantiene un balance de nutrientes. No obstante, Muñoz et al. (2013) han realizado investigaciones donde encontraron que la implementación de sistemas agrícolas en estas zonas, en algunas ocasiones puede llevar a la ocurrencia de dos tipos de proble-

mas: a) la degradación química del suelo, producto de la acumulación de sales solubles, y b) problemas de degradación física de suelos, como compactación, pérdida de estructura, los cuales no sólo provocan un déficit nutricional, sino que también disminuyen el potencial productivo de estos suelos.

Tabla 5. Áreas correspondientes a los diferentes niveles de fertilidad química de suelo (IFQ) en el municipio Falcón.

Índice de fertilidad	Superficie (ha)	% de las Áreas
Bajo	105.000	59,56
Medio	34.852	19,77
Alto	36.433	20,67

Fuente: Elaboración propia, (2021).

En relación a esta problemática, y en el caso particular de las zonas semiárida del estado Falcón se ha observado en los últimos años un proceso de degradación continua de la tierra, debido a la predominancia de sistemas agrícolas inapropiados (Mogollón et al., 2017), lo que ha traído como consecuencia incremento de suelos afectados por sales, erosión hídrica y eólica, resultando todo ello en una reducción de la fertilidad de los suelos.

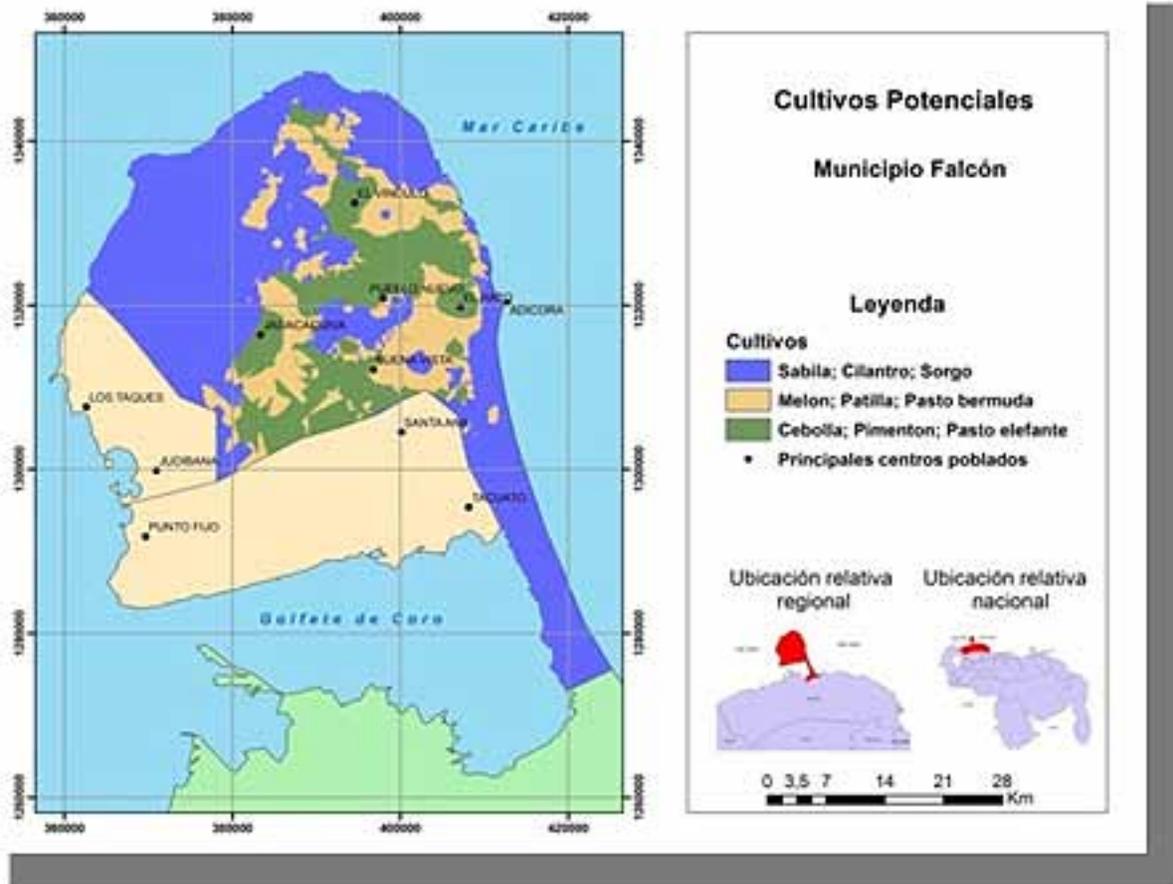
Zonificación de cultivos potenciales en los suelos del municipio Falcón

La zonificación de los suelos en función de la fertilidad que presentan, permitió finalmente realizar una distribución potencial de algunos cultivos tradicionales en la Península de Paraguaná en función de sus requerimientos nutricionales (**Figura 8**), es decir, la ubicación de los cultivos de altos requerimientos como cebolla (*Allium cepa*), pimentón (*Capsicum*

annuum) y pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) en las zonas identificadas con suelos de alta fertilidad. Cultivos con requerimientos nutricionales moderados como melón (*Cucumis melo*), patilla (*Citrullus lanatus*) y pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) en los suelos de fertilidad media; y los cultivos con bajos requerimientos de nutrientes, tales como el cilantro (*Coriandrum sativum*), sábila (Aloe vera) y sorgo (*Sorghum bicolor*) en los suelos con el índice de fertilidad baja.



Figura 8. Distribución espacial de los cultivos potenciales en los suelos del municipio Falcón.



Fuente: Elaboración propia, (2021).

De esta manera, cultivos cuyos requerimientos nutricionales van de medios a altos, estarían mejor ubicados en la zona centro-oriental de la Península, rodeando los principales centros poblados (Pueblo Nuevo, El Hato, Jadacaquiva, El Vínculo y Buena Vista).

La planificación del uso del suelo con el fin de mejorar los ren-

dimientos de los cultivos implica conocer la variabilidad espacial de los nutrientes en el suelo, para lo cual resultan imprescindibles los mapas digitalizados y georreferenciados con información detallada de diferentes zonas en el país, tal como lo señala Villareal (2018). De tal manera que podemos indicar que la información generada en este trabajo permite la zonifica-

ción de los cultivos potenciales para la península de Paraguaná, y al mismo tiempo se establecen las áreas marginales (con bajos niveles de fertilidad) donde no es recomendable el desarrollo de cultivos de alta demanda de nutrientes.



Conclusiones

Se encontró que el nitrógeno es escaso en toda la superficie del municipio, con algunos parches heterogéneos de mayor acumulación, producto de condiciones de microclima y aporte de materia orgánica por las plantas presentes en estas islas de fertilidad. Por esta razón podría ser considerado como el nutriente más limitante en las zonas áridas evaluadas.

La distribución espacial del Fósforo en el municipio, podría estar asociada a la aplicación antrópica como fertilizantes químicos, lo cual se relaciona al carácter resi-

dual de este elemento químico en el suelo.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se concluye que los suelos del municipio Falcón en la Península de Paraguaná están caracterizados principalmente por poseer grandes cantidades de Potasio intercambiable.

En cuanto al pH de los suelos evaluados, este tiende a presentar una reacción entre neutra y alcalina, típica de las zonas áridas.

El índice de fertilidad químico del suelo indicó que un 60 % de

la superficie del municipio posee una baja fertilidad natural; los suelos con esta condición se ubican fundamentalmente hacia la zona centro-occidental del municipio y en el Itsmo de los médanos. Por otra parte, un 40% de la superficie del municipio presenta una fertilidad que va de media a alta, y la misma se ubica en la zona centro-oriental del municipio, que es precisamente donde convergen con las principales zonas agrícolas de la Península de Paraguaná.

La información generada permitió la zonificación de cultivos potenciales en este municipio de la Península de Paraguaná.

Referencias

- Aponte, H., Paolini, J., Mogollón, J.P. (2011). Efecto del cují asociado al cultivo de sábila sobre las propiedades bioquímicas de un suelo del semiárido falconiano. *Agronomía Tropical*. 6(1): 5-13.
- Biradar, B., Jayadeva, H., CHannakeshava, S., Geetha, K., Manjanagouda, S., Pavan, A.S., Prakash, K. (2020). Assessment of soil fertility through GIS techniques and thematic mapping in micro-watershed of Hassan, Karnataka. *Journal of Pharmocognosy and Phytochemistry*. 9(4):3218-3228.
- Cahyono, P., Loekito, S. Wiharso, D., Rhamat, A., Komariah, Nishimura, N., Senge, M. (2020). Patterns of nutrient availability and exchangeable aluminum affected by compost and dolomite in red acid soils in Lampung, Indonesia. *International Journal of Geomate*. 19(76):173-179.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Segunda Edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 482 p.
- Celaya, H., Castellanos, A. (2011). Mineralización del nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*. 29(3): 343-356.



- Dalence, S. (2003). Spatial analysis, interpretation and regionalization of groundwater quality data in the central valley of Cochabamba (Bolivia). International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). Master of Science Thesis. Enschede, Holland, 172 p.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F., Gallardo, A., Bowker, M., Wallenstein, M., Quero, J., Soliveres, S. et al. (2013). Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*. 502: 672-676.
- Fernández, A., Villafañe, R., Hernández, R. (2011). Calidad del agua de riego y afectación de los suelos por sales en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 61(3-4):253-265.
- Gabriels, D., Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venezuelos*. 14(1):37-48.
- Gallardo, A. (2006). *Geoestadística. Ecosistemas*. 15(3): 48-58.
- Garbanzo - León, J.G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*. 93:1-22.
- Grossman, R., Reinsch, T. (2002). Bulk density and linear extensibility. In J.H. Dane and Clarke, G. (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods*. Pp:201-228. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI, USA.
- Havlin, J., Heiniger, R. (2020). Soil fertility management for better crop production. *Agronomy* 10(9):1349.
- Helmke, P.A., Sparks, D.L. (1996). Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. In D.L. Sparks et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Pp:551-574. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Henríquez, C., Méndez, J.C., Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis Kriging y su validación. *Agronomía Costarricense* 37(2):71-82.
- Hernández, T., Salcedo, E., Arévalo, G., Galvis, A. (2007). Evaluación de la concentración de lignina como indicador de la capacidad de aporte de nitrógeno de residuos orgánicos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 13(1):5-13.
- INE. (2013). *Boletín demográfico 2013*. Instituto Nacional de Estadística. Boletín N° 1. República Bolivariana de Venezuela.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Arfo Editores, Medellín. 613 p.
- Kassai, P., Tóth, G. (2020). Agricultural soil phosphorus in Hungary: high resolution mapping and assessment of socioeconomic and pedological factors of spatio temporal variability. *Sustainability*. 12(13):5311.
- Kosmas, C., Ferrara, A., Briassouli, H., Imeson, I. (1999). Methodology for mapping ESAs to desertification. p. 31 – 47. En: Kosmas, C. Kirkby, M. and Geeson, N. (ed.) *The MEDALUS project. Mediterranean Desertification*



- and Land Use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. European Commission.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. In D.L. Sparks et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Pp:869-919. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI, USA.
- Matteucci, S. (1987). The vegetation of Falcon State. *Vegetatio*. 70:67-91.
- Mogollón, J.P., Rivas, W., Rivas, J.G., Martínez, A. (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a la desertificación en la península de Paraguaná, Venezuela. *Ágora de Heterodoxia*. 3(2):94-110.
- Mogollón, J.P., Rivas, W., Alvizu, P., Márquez, E., Colmenares, M., Lemus, L., Hernández, S., MARTÍNEZ, A. (2016). Calidad de la Vegetación como Indicador de Desertificación en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Ágora de Heterodoxia*. 2(2):72-97.
- Mogollón, J.P., Rivas, W., Márquez, E., Lemus, L., Colmenares, M., Muñoz, B., Martínez, A., Hernández, S., Arrieta, L., Campos, Y. (2015a). Delimitación de áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Croizatia*. 16(1&2):51-73.
- Mogollón, J.P., Rivas, W., Muñoz, B., Martínez, A., Márquez, E., Arrieta, L., Lemus, L., Colmenares, M., Campos, Y., Hernández, S. (2015b). Calidad del Suelo como Indicador de Desertificación en la Península de Paraguaná, Estado Falcón, Venezuela. *Croizatia*. 16(1&2):7-24.
- Mulvaney, R.L. (1996). Nitrogen Inorganic Forms. In D.L. Sparks et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Pp:1123-1184. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, WI, USA.
- Muñoz, D., Ferreira, M., Escalante, I., López, J. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra*. 31(3):201-210.
- Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Science*. 2019:1-9.
- Porta, J., López, M., Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Tercera edición, Ediciones Mundi-prensa, Madrid, España. 929 p.
- Rivas, W., Mogollón, J.P. (2015a). Calidad del clima como indicador de desertificación en la Península de Paraguaná, Estado Falcón, Venezuela. *Croizatia*. 16(1&2):25-35.
- Rivas, W., Mogollón, J.P. (2015b). Calidad de gestión como indicador de desertificación en la Península de Paraguaná, Estado Falcón, Venezuela. *Croizatia*. 16(1&2):37-50.
- Römhheld, V., Kirkby, E.A. (2010). Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant Soil*. 335(1-2):155-180.
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 18(3):529-541.



- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D.L. Sparks et al. (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Pp:475-490. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Torres, D., Álvarez, J., Contreras, J., Henríquez, M., Hernández, W., Lorbes, J., Mogollón, J.P. (2017). Identificación de potencialidades y limitaciones de suelos agrícolas del Estado Lara, Venezuela. *Bioagro*. 29(3):207-218.
- Tsai, H., Schmidt, W. (2021). The enigma of environmental pH sensing in plants. *Nature Plants* 7:106–115.
- Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso del nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. Ediciones del Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT). Ciudad de México, México. 12 p.
- Villareal, J. (2018). Mapas de fertilidad como herramienta para zonificación de suelos en Panamá. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 31:32-39.
- Wall, D., Plunkett, M. (2020). Major and micro nutrient advice for productive agricultural crops. 5th Edition. Teagasc, Johnstown Castle, Environmental Research Centre, Wexford, Ireland. 180 p.
- Whetton, R.L., Zhao, Y., Nawar, S., Monazen, A.M. (2021). Modelling the Influence of Soil Properties on Crop Yields Using a Non-Linear NFIR Model and Laboratory Data. *Soil System*. 5(12):1-15.

