

Aplicación del modelo simplificado para estimar dosis sustentables de fertilización fosforada en el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

Application of the simplified model to estimate sustainable doses of phosphorus fertilization in the habanero chili crop (*Capsicum chinense* Jacq.)

Brenda Aremmy Ramírez-Vargas*, Eugenio Carrillo-Ávila**✉, José Jesús Obrador-Olán***, Domingo Coh-Méndez**, Avelardo Monsalvo-Espinosa**, Everardo Aceves-Navarro**

Ramírez-Vargas, B. A., Carrillo-Ávila, E., Obrador-Olán, J. J., Coh-Méndez, D., Monsalvo-Espinosa, A., & Aceves-Navarro, E. (2019). Aplicación del modelo simplificado para estimar dosis sustentables de fertilización fosforada en el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 27(78), 23-33.

RESUMEN

El cultivo de chile habanero es fuente de ingresos para productores de la península de Yucatán. Se estableció un experimento en julio de 2017, muestreando previamente el suelo de la parcela, de textura franco arcillosa, aplicándose tres tratamientos de fertilización: 56, 112 y 168 kg ha⁻¹ de fósforo, definidos con base en el manejo de los productores. Se midió el número y peso de frutos y el rendimiento. Al final se realizaron muestreos de suelo y plantas en cada tratamiento, evaluando las concentraciones de macro y micronutrientes en

Palabras clave: chile habanero; fertilización; fósforo; dosis; sustentabilidad; rendimiento.

Keywords: habanero chili; fertilization; phosphorus; dose; sustainability; crop yield.

Recibido: 16 de noviembre de 2018, aceptado: 1 de julio de 2019

* Programa de Maestría en Ciencias en Bioprospección y Sustentabilidad Agrícola en el Trópico, Colegio de Postgraduados campus Campeche. Carretera Federal Huitichén-Edzna km 17.5, Sihochac, municipio de Champotón, C. P. 24450, Campeche, México. Correo electrónico: ramirez.brenda@colpos.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3740-2874>

** Colegio de Postgraduados campus Campeche. Carretera Federal Huitichén-Edzna km 17.5, Sihochac, municipio de Champotón, C. P. 24450, Campeche, México. Correo electrónico: ceugenio@colpos.mx; domingocoh@colpos.mx; amonsalvoe@colpos.mx; everardo.aceves@colpos.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8018-7869>; <http://orcid.org/0000-0001-5257-3861>; <http://orcid.org/0000-0002-0236-1657>; <http://orcid.org/0000-0003-2711-7412>

*** Colegio de Postgraduados campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n, H. Cárdenas, C. P. 86500, Tabasco, México. Correo electrónico: obradoro@colpos.mx. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2233-3431>

✉ Autor para correspondencia

raíces, tallos, hojas y frutos; así como en las muestras de suelo iniciales y finales. No se encontraron efectos significativos de los tratamientos por efecto de las dosis crecientes de fertilización fosforada, con rendimientos de fruto entre 63.4 y 69.7 t ha⁻¹. Se aplicó el modelo conceptual simplificado para estimar la dosis de fertilización que contribuya a la sustentabilidad de su manejo.

ABSTRACT

Habanero chili crop is a source of income for producers on the Yucatan Peninsula. An experiment was set up in July 2017 by previously taking a soil sample of the plot, with a loamy clay texture, and applying three fertilization treatments: 56, 112 and 168 kg ha⁻¹ of phosphorus, defined according to the management of the producers. The number and weight of the fruits and the yield were measured. In the end, we evaluate the initial and final soil and plant samples collected at each treatment on macro and micronutrient concentrations in roots, stems, leaves, and fruits. We found no significant effects of the treatments by the effect of increasing doses of phosphate fertilizers, the fruit yield ranging from 63.4 to 69.7 t ha⁻¹. In this study, we applied the simplified conceptual model to estimate the fertilization dose that contributes to the sustainability of their management.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es base de una fuente considerable de ingre-

En la Península de Yucatán. Actualmente 40% de la producción nacional, de poco más de 4,500 t anuales (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2019) se obtiene en esta región, que cuenta con la denominación de origen para su producción (Fideicomiso de Riesgo Compartido [FIRCO], 31 de mayo de 2017). Las superficies cultivadas en el país van en aumento, debido principalmente a la mayor demanda de esta especie en los mercados nacional e internacional (SIAP, 2019). En México 80% de la producción se consume como fruto fresco y el resto se utiliza para la elaboración de salsas, pastas y deshidratados. En el mercado internacional se exporta principalmente a Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Italia y Alemania (FIRCO, 31 de mayo de 2017).

Para el adecuado desarrollo del cultivo es necesario aplicar fertilizantes que permitan obtener frutos de buena calidad. Una dosis de fertilización de macro y micronutrientes lo más cercana a las necesidades reales de las plantas contribuirá, por una parte, a que no tengan restricciones en su crecimiento y, por otra parte, a que la inversión sea solo la necesaria además de asegurar la sostenibilidad del recurso suelo y limitar el impacto ambiental, objetivos principales de la agricultura moderna (Yousaf et al., 2017).

En la Península de Yucatán los contenidos de calcio (Ca) en los suelos son altos debido a su origen cárstico, con pH de neutro a alcalino. En este rango de pH la disponibilidad de fósforo (P) para los cultivos se reduce debido a que se adsorbe en la superficie de los carbonatos de calcio y de las arcillas (Naeem, Akhtar, & Ahmad, 2013). Además, el fósforo que se encuentra en forma soluble en el suelo o el que se aplica con los fertilizantes interactúa con el calcio para formar fosfatos dicálcicos y tricálcicos de muy baja solubilidad, que no pueden ser absorbidos por las plantas, lo que reduce aún más su disponibilidad para los cultivos (Mahdi, Talat, Hussain Dar, Hamid, & Ahmad, 2012), lo que causa deficiencia de este elemento. El fósforo está involucrado en múltiples funciones necesarias para el metabolismo de las plantas como la división y desarrollo celulares, la realización de la fotosíntesis, la descomposición de los azúcares, la transferencia de energía y la transferencia y expresión de nutrientes (Mahdi et al., 2012).

Recientemente se ha iniciado el empleo de enfoques conceptuales para establecer la dosis de fertilización en cultivos a fin de optimizar el uso de dichas sustancias. En este trabajo se empleó el modelo conceptual simplificado (Rodríguez, 1990), usado para establecer recomendaciones de fertilización en diferentes cultivos, para responder: a) cuál debe ser la dosis a aplicar en una parcela para obtener determinado rendimiento en un cultivo, bajo las condiciones de clima y disponibilidad de agua locales; b) cuánto nutriente es proporcionado por el suelo; y c) cuál es la recuperación del nutriente de un fertilizante por el cultivo. Las dosis se establecen con base en lo establecido por Rodríguez (1990):

$$DF = \frac{DEM - SUM}{EF} \quad (1)$$

donde:

DF = Dosis de fertilización del nutriente (kg ha^{-1})
 DEM = Demanda del nutriente por el cultivo (kg ha^{-1})
 SUM = Suministro del nutriente por el suelo (kg ha^{-1})
 EF = Eficiencia de aprovechamiento del fertilizante por el cultivo (adimensional)

La cuantificación de la variable DEM , equivalente a la extracción del nutrimento, se realiza en las diferentes partes de la planta. En la práctica, DEM es expresada para un nivel de rendimiento esperado, con base en la producción de materia seca (MS) bajo las condiciones edáficas, climáticas y de manejo agronómico (nivel de tecnificación) disponibles:

$$DEM = \frac{MS * PN}{100} \quad (2)$$

donde:

MS = Producción de materia seca esperada en el cultivo (kg ha^{-1})
 PN = Porcentaje del nutriente en la materia seca del cultivo

La variable SUM depende del suelo, clima y manejo y su estimación se realiza con análisis químico del suelo. EF es la fracción del fertilizante aplicado que es aprovechado por la planta y depende del tipo de cultivo, tipo de suelo, fuente de fertilizante, época y forma de aplicación. En el caso del N la eficiencia se estima entre 0.5 y 0.6, para el caso del P es de 0.2 a 0.4 y para el caso del K la eficiencia se estima entre 0.6, 0.5 y 0.4 para suelos arenosos, francos y arcillosos, respectivamente (Rodríguez,

1990). Aunque los productores aplican fertilizantes al cultivo con base en paquetes tecnológicos, no toman en cuenta la cantidad de nutrientes del suelo, ya que generalmente no realizan análisis químicos o si los realizan no los consideran, por lo que no se sabe a ciencia cierta si las dosis aplicadas son correctas, excesivas o deficitarias.

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar dosis de abono con P, bajo la hipótesis de que es posible realizar una estimación de la demanda máxima del elemento por el cultivo de chile habanero, para su posterior aplicación con el uso del método conceptual simplificado, a fin de realizar recomendaciones de fertilización con P para el cultivo en los suelos calizos de la península de Yucatán y contribuir a establecer un manejo sostenible de los fertilizantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y clima

El experimento se desarrolló en el lapso comprendido desde septiembre de 2017 hasta marzo de 2018, en una parcela propiedad de un productor cooperante, en el ejido de Castamay, municipio y estado de Campeche, con coordenadas 19°49'54.51" N, y 90°25'30.60" O. El clima predominante es AW0, cálido subhúmedo, con lluvias en verano (García, 1973). La temperatura media anual es de 26.8 °C; el promedio más alto es de 29.6 °C en mayo y el más bajo de 23.2 °C, en enero. La precipitación pluvial promedio en la región va de 1,003.0 a 1,099.9 mm al año.

Material vegetal y establecimiento del cultivo

Se utilizó el híbrido de chile habanero conocido como Rey Pakal. El trasplante se realizó el 4 de septiembre de 2017, con una distancia de 40

cm entre las plantas y 1.5 m entre surcos, a una densidad de siembra de 16,670 plantas por ha. En total se realizaron siete cortes de frutos, el primero el 22 de noviembre de 2017 y el último el 16 de marzo de 2018.

Análisis químico del suelo previo a la realización del trabajo

La tabla 1 incluye los resultados del análisis fisicoquímico de la muestra compuesta de suelo del área experimental, tomada antes de la realización del trabajo a una profundidad de 30 cm.

El contenido de P intercambiable en el suelo resultó alto, inesperado en suelos calizos como los de la península de Yucatán, en los que dicho elemento tiende a precipitarse en forma de fosfatos de calcio (Mahdi et al., 2012), aunque dosis altas del mismo usadas ciclo tras ciclo tienden a acumularlo en el suelo. El P del suelo se puede encontrar en forma lábil que las plantas pueden absorber, o en forma no disponible. Cuando se agrega al suelo con la fertilización, se incorpora al P lábil, donde es rápidamente absorbido por la planta. La adsorción se da solo si este elemento en forma soluble no es tomado rápidamente por el cultivo (Batjes, 2011).

Tratamientos, diseño experimental y unidades experimentales

La demanda de P por las plantas de chile se expresa con base en la producción de materia seca, función de las condiciones de nutrición, entre otros factores, bajo los que se desarrollan. Para la aplicación del modelo conceptual se debe cuantificar la demanda máxima del P que se obtiene bajo ninguna restricción del mismo en el suelo, considerada como indicador del rendimiento máximo. Para ello se aplicaron tres tratamientos de fertilización con P:

Tabla 1
Resultados del análisis químico del suelo de la parcela experimental antes de la realización del trabajo

Elemento	Concentración (p. p. m)	Elemento	Concentración (p. p. m)	Elemento	Concentración (p. p. m)
S	1.45	B	1.1	Cu	2.49
Na	30.20	Mg	277.0	K	603.00
N-NO3	7.67	Mn	23.8	P-Olsen	28.67
Fe	8.06	Ca	3464.0	MO	3.69%
Zn	1.64				

Nota: Todas las concentraciones están expresadas en p. p. m, con excepción de la materia orgánica (MO), expresada en porcentaje. Elaboración propia.

- T1= Mitad de la dosis de fertilización fosforada respecto a la empleada por el productor
 T2= Dosis de fertilización fosforada igual a la empleada por el productor
 T3= 150% de la dosis de fertilización fosforada respecto a la empleada por el productor

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con los tratamientos asignados aleatoriamente en tres surcos de 25 m de largo como unidades experimentales, con tres repeticiones. En el surco central (para eliminar el efecto de orilla) se marcaron cuatro plantas en las que se cuantificaron las variables de respuesta: número de frutos (NF), tamaño (ancho y largo), peso de frutos por planta (PFP) y con base en este valor se estimó el rendimiento del cultivo (Ren). Se realizaron mediciones en cuatro plantas por repetición.

Fertilización

Los abonos fueron aplicados tres veces por semana de septiembre de 2017 a febrero de 2018 con aspersor de mochila directamente al tronco de la planta, con base en el paquete tecnológico elaborado por el INIFAP (Avilés, Dzib, & Pereyda, 2010). La fertilización manejada por el productor cambió como se muestra en la tabla 2. Se usaron los fertilizantes MAP (12-61-0), NKS (12-0-46), K₂SO₄ (0-0-52), urea (46-0-0), nitrato de magnesio (11-0-0) y HM (10-55-10), calculándose las cantidades por tratamiento y etapa (tabla 3).

Fue necesario complementar el abonado con micronutrientes mediante formulaciones comerciales mixtas que contenían hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y Cobre (Cu); quelatos con EDDHA.

Tabla 2
Etapas fenológicas y número de fertilizaciones aplicadas al cultivo

Etapas fenológicas		Periodo	Número de fertilizaciones
Primera	Trasplante a inicio de floración	4/sep a 20/oct	14
Segunda	Floración y amarre de frutos	21/oct a 5/nov	5
Tercera	Fructificación	6/nov a 25/enero	20
Cuarta	Finalización	26/enero a 9/febrero	4

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3
Dosis de fertilización empleadas para cada etapa fenológica y para los tres tratamientos evaluados, establecidas con base en el manejo dado por el productor

Etapas fenológicas	Fórmula del productor (kg ha ⁻¹)			Dosis baja en P (kg ha ⁻¹)			Dosis alta en P (kg ha ⁻¹)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Primera	21.91	55.80	42.00	21.91	27.90	42.00	21.91	83.70	42.00
Segunda	3.66	3.15	15.97	3.66	1.58	15.97	3.66	4.73	15.97
Tercera	14.43	12.35	63.15	14.43	6.18	63.15	14.43	18.53	63.15
Cuarta	8.00	40.70	34.68	8.00	20.35	34.68	8.00	61.05	34.68
TOTAL	48.00	112.00	155.80	48.00	56.00	155.80	48.00	168.00	155.80

Nota: Elaboración propia.



Figura 1. Corte de frutos en el cultivo.
Fotografía del equipo de investigación.

Control de malezas, plagas y enfermedades

Antes del trasplante se hizo una aplicación de herbicida (glifosato), posteriormente las malezas fueron removidas de manera manual cada semana. Se presentaron las plagas picudo del chile (*Anthonomus eugenii*) y mosquita blanca (*Bemisia tabaci*). Su control se realizó con plaguicidas de contacto y sistémicos con el uso de Imidacloprid (Confidor®) aplicado al follaje a una dosis de 750 ml diluidos en 400 litros por hectárea, y en algunas etapas con hongos entomopatógenos aplicando cepas de *Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana*, a una concentración de 2×10^{10} conidias por litro de agua asperjando sobre el follaje.

Cosecha

Se inició el 22 de noviembre de 2017, cuando los frutos alcanzaron un tamaño mayor a 4 cm (figura 1), presentaron una buena firmeza al tacto y una coloración verde o naranja brillante. Los siguientes cortes, siete en total, se realizaron aproximadamente cada 15 o 20 días dependiendo del estado del fruto. El último corte se realizó el 16 de marzo de 2018.

Concentración de nutrientes en suelo y planta

Al final del experimento se recolectaron muestras de suelo y se hizo un muestreo destructivo de plantas en cada tratamiento. Se extrajo una planta del surco central por tratamiento (en una sola repetición) cortando tallos, raíces, hojas y frutos en trozos, colocándolos de manera separada en bolsas de papel. Se pesaron en húmedo, y se secaron en un horno marca Binder a 70 °C, de 4 a 7 días, hasta peso

constante. Se molieron y trituraron para su análisis químico. La determinación de la concentración de N se realizó por el método de micro Kjeldahl, la concentración de K y micronutrientes se realizó con un espectrómetro de absorción atómica y la determinación de P por el método de Bray Kurtz (McKean, 1993).

Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico del diseño completamente al azar para todas las variables de respuesta. Donde hubo efectos significativos de los tratamientos se realizó la comparación de medias con el método de Tukey (Tukey, 1991) con un nivel de significancia $p=0.05$.

RESULTADOS

Variables de rendimiento

Ancho, largo, peso promedio y peso total de frutos por planta. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en estas variables. En la figura 2 se muestran los promedios, con valores ligeramente superiores en el ancho de los frutos (AF) en T3. En contraste, se obtuvieron en T1 valores medios ligeramente mayores en la longitud de los frutos (LF). Tanto el peso promedio de los frutos (PPF) como el peso total de frutos por planta (PPF) resultaron superiores en T3, aunque estadísticamente iguales en todos los casos.

Número total de frutos por planta y rendimiento. No se encontraron efectos estadísticos significativos de los tratamientos. En la figura 3 se muestra la comparación del número total de frutos por planta (NFP) y del rendimiento final del cultivo (Ren) por tratamiento. NFP resultó en promedio un poco

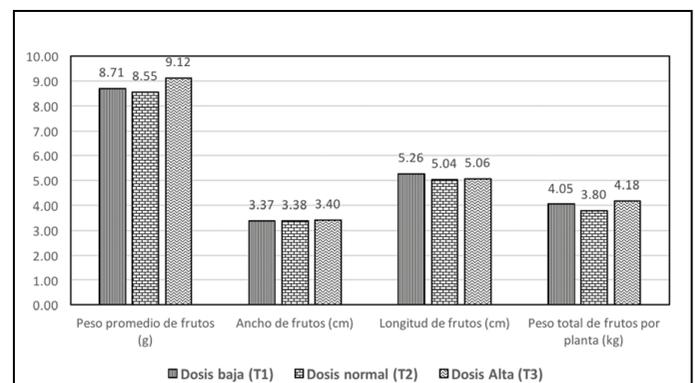


Figura 2. Peso, ancho y largo de frutos, y peso total de frutos por planta para cada tratamiento evaluado. Elaboración propia.

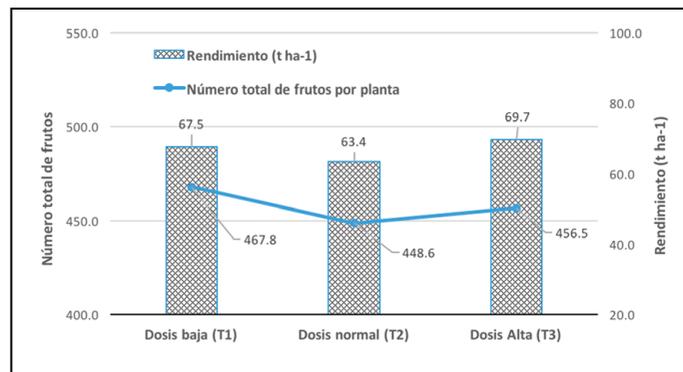


Figura 3. Número total de frutos por planta y rendimiento del cultivo para los tratamientos evaluados. Elaboración propia.

mayor en T1. Como los valores de *Ren* se derivan del *PPF* y de *NFP*, variables en las que no se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, tampoco

en *Ren* se obtuvieron. Los rendimientos en los tres tratamientos fueron muy superiores al rendimiento medio que se obtiene en Campeche, de alrededor de 18 t ha⁻¹ (SAGARPA, 2015), pero dentro del rango de los obtenidos por los productores más tecnificados, de entre 40 y 70 t ha⁻¹ de fruto.

Análisis químico final en suelo y componentes de las plantas

Únicamente se realizaron análisis químicos en una muestra compuesta de todas las repeticiones de cada tratamiento para cada componente (hojas, raíz, tallos y frutos), por lo que no fue posible hacer un análisis estadístico de esta información. La tabla 4 incluye las concentraciones de macro y micronutrientes en hojas por tratamiento, y las tablas 5, 6 y 7 incluyen las correspondientes a raíz, tallos y frutos, respectivamente.

Tabla 4
Concentración de nutrientes en hojas por tratamiento

MUESTRA FOLIAR	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	MICROELEMENTOS (mg/kg)				
						Fe	B	Zn	Mn	B
Dosis alta	2.93	0.414	4.642	3.754	0.496	196.52	204.19	116.00	193.55	64.59
Dosis normal	3.89	0.433	4.613	3.853	0.522	184.90	167.56	118.70	201.53	61.60
Dosis baja	2.52	0.467	4.575	3.178	0.476	201.27	192.18	113.58	172.69	57.60

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5
Concentración de nutrientes en raíz por tratamiento

MUESTRA	Humedad (%)	Cenizas (%)	NT (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O	MICROELEMENTOS (mg/kg)				
									Fe	Cu	Zn	Mn	B
Dosis alta	7.93	10.46	1.80	0.331	1.310	2.207	0.145	0.235	1992.71	19.31	14.63	209.66	12.65
Dosis normal	7.45	9.35	1.68	0.326	1.261	2.201	0.147	0.186	1810.38	18.56	15.00	187.86	14.10
Dosis baja	7.30	10.86	1.86	0.338	1.346	2.595	0.154	0.218	2081.37	18.37	15.99	247.58	13.39

Nota: Elaboración propia.

Tabla 6
Concentración de nutrientes en tallo por tratamiento

MUESTRA	Humedad (%)	Cenizas (%)	NT (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O	MICROELEMENTOS (mg/kg)				
									Fe	Cu	Zn	Mn	B
Dosis alta	8.30	7.34	1.28	0.256	2.242	2.786	0.407	0.173	286.66	39.9	31.74	69.84	18.44
Dosis normal	8.39	7.80	1.25	0.216	1.968	2.694	0.421	0.171	245.82	55.1	40.98	103.5	12.80
Dosis baja	8.65	7.54	1.48	0.236	2.280	2.683	0.388	0.195	315.30	48.8	39.37	99.54	13.93

Nota: Elaboración propia.

Tabla 7
Concentración de nutrientes en frutos por tratamiento

MUESTRA	Humedad (%)	Cenizas (%)	NT (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O	MICROELEMENTOS (mg/kg)				
									Fe	Cu	Zn	Mn	B
Dosis alta	16.16	6.24	1.62	0.678	4.374	0.269	0.231	0.280	59.85	17.06	25.05	11.53	12.25
Dosis normal	17.97	6.07	1.72	0.638	3.796	0.245	0.218	0.310	69.69	18.94	23.93	11.38	13.34
Dosis baja	17.70	6.54	1.83	0.687	3.927	0.266	0.254	0.260	73.00	18.75	22.32	12.40	14.33

Nota: Elaboración propia.

Tabla 8
Suministro de elementos por el suelo para la muestra inicial

Elemento	Suministro (kg ha ⁻¹)	Elemento	Suministro (kg ha ⁻¹)	Elemento	Suministro (kg ha ⁻¹)
Nitrógeno total	6,660.00	Mg	1,448.21	Cu	8.75
Nitrógeno inorgánico	133.20	Na	755.14	Zn	6.23
P	77.51	K	2,558.09	Mn	233.28
Ca	12,116.88	Fe	23.65	B	2.38

Nota: Elaboración propia.

Aplicación del modelo conceptual

Suministro de nutrientes. La tabla 8 incluye el suministro de nutrientes del suelo, basado en el análisis químico de la muestra inicial, constituido por la proporción de nutrimentos disponibles en el suelo que la planta puede eventualmente utilizar. El pH fue de 7.47, moderadamente alcalino, con textura

franco arcillosa y conductividad eléctrica de 0.51 dS m⁻¹, baja y por tanto libre de sales, con alto contenido de materia orgánica. Moderadamente bajo N en forma de nitratos, con alto suministro de K y alto contenido de P intercambiable (28.67 p. p. m.). Contenidos de Ca y de Mg moderadamente altos y muy bajo contenido de carbonatos totales (1.54%).

Los resultados del muestreo final se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9
Suministro de elementos por el suelo por tratamiento.
Muestras tomadas después del trabajo experimental (kg ha⁻¹)

Elemento	Dosis baja	Dosis normal	Dosis alta	Elemento	Dosis baja	Dosis normal	Dosis alta
N total	6,876.00	6,948.00	7,344.00	K	2,560.90	2,337.66	2,607.23
N inorgánico	137.52	138.96	146.88	Fe	17.5	22.5	24.3
P	77.04	84.85	91.58	Cu	7.92	8.42	8.96
Ca	13,340.88	13,106.88	13,268.88	Zn	5.44	6.19	4.79
Mg	1,349.68	1,482.73	1,558.73	Mn	164.66	210.64	219.67
Na	766.73	803.99	722.02	B	2.12	1.76	2.27

Nota: Elaboración propia.

Tabla 10
Demanda de nutrientes en los diferentes componentes de las plantas por tratamiento evaluado (g planta⁻¹)

C	E	Tratamientos			C	E	Tratamientos		
		DB	DN	DA			DB	DN	DA
HOJAS	N	1.226	1.426	1.465	FRUTOS	N	2.126	2.051	2.302
	P	0.227	0.159	0.207		P	0.348	0.332	0.42
	K	2.227	1.691	2.321		K	3.83	3.758	5.159
TALLOS	N	3.631	3.192	2.825	TOTAL	N	8.112	7.588	7.564
	P	0.252	0.24	0.246		P	0.917	0.809	0.951
	K	4.643	4.171	4.106		K	11.377	10.192	12.174
RAIZ	N	1.128	0.918	0.972					
	P	0.089	0.078	0.078					
	K	0.678	0.572	0.587					

Notas: C= Componente; E= Elemento; DB= Dosis baja; DN= Dosis normal; DA= Dosis alta. N= Nitrógeno; P= Fósforo; K= Potasio.
Elaboración propia.

Demanda de nutrientes por el cultivo. La demanda de un nutriente de un cultivo es la cantidad necesaria para alcanzar cierta productividad. En el presente trabajo la que interesa es la máxima que se puede alcanzar en la parcela experimental, para establecer una estimación de la máxima demanda del cultivo. Se estimó con base en los análisis químicos de los componentes de la planta (hojas, tallo, raíces y frutos) y con los valores del peso seco de la materia

orgánica en cada caso. La cantidad total de cada macronutriente se calculó sumando la demanda de todos los componentes de la planta, cuyos valores promedio por tratamiento se incluyen en la tabla 10, y con base en los cuales se calcularon los valores medios de la demanda de macronutrientes que se muestran en la tabla 11. Éstos pueden posteriormente tomarse como referencia para el cálculo de la dosis de fertilización en el cultivo.

Tabla 11
Demanda promedio de macronutrientes por
tratamiento (kg ha⁻¹)

	N	P	K
Dosis baja	135.2	15.3	189.6
Dosis normal	126.5	13.5	169.9
Dosis alta	126.1	15.9	202.9

Nota: Elaboración propia.

Dosis de fertilización. La demanda de macronutrientes fue en los tres casos menor que el suministro. Aplicando la ecuación 1 se obtienen dosis de fertilización negativas, irreales, en cuyo caso se recomienda aportar al suelo la mitad de la cantidad de cada macronutriente que será extraída por el cultivo para evitar su agotamiento. Puesto que no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos, en el cálculo de la dosis se aplicó la demanda de nutrientes del tratamiento T2. Con una eficiencia de aprovechamiento del fertilizante de 0.50, 0.25 y 0.40 para N, P y K, respectivamente (Rodríguez, 1990), con la ecuación 1 se calculó la dosis sugerida (tabla 12).

Tabla 12
Dosis de fertilización para el cultivo de chile habanero (kg ha⁻¹)

N	P	K
126.47	61.73	212.34

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Variables de rendimiento

La falta de diferencias estadísticas en *AF*, *LF*, *PPF*, *FPF*, *NFP* y *Ren* no era de esperarse, ya que en los suelos calizos de la península de Yucatán el P disponible para las plantas tiende a fijarse debido a su reacción química con el Ca. Los resultados pueden explicarse, más bien, por la elevada fertilización que los productores aplican. Las dosis compensan las deficiencias de P ocasionadas por reacciones de fijación en el suelo, pero derivado del presente trabajo, puede concluirse que son excesivas y podrían contaminar mantos freáticos. No se encontraron referencias a trabajos similares realizados en la península de Yucatán.

Análisis químico final en suelo y componentes de las plantas

El mayor valor de P en hojas se observó en T1 y el

más bajo en T3, con diferencias mínimas (tabla 4), atribuibles a la excesiva cantidad de fertilizantes aplicados, que compensó las deficiencias de P. Similarmente, Tun (2000) no encontró diferencias significativas en las concentraciones de N, P y K en las hojas del chile habanero. En este trabajo se encontraron niveles más altos de K en las hojas, casi el doble que el de N, y casi diez veces el de P. Estas concentraciones hacen evidente que la nutrición del cultivo se mantuvo en un régimen de suficiencia durante todo el ciclo, debido a que las plantas sólo absorben las cantidades requeridas de nutrientes para su desarrollo normal. Dado que no se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, todas las plantas tuvieron el suministro nutrimental necesario (excesivo). De manera similar a las hojas, en ninguno de los demás componentes (raíz, tallos y frutos) se observó tendencia creciente o decreciente en la concentración de P de acuerdo al tratamiento. Las diferencias fueron muy pequeñas, atribuibles a los errores experimentales.

Aplicación del modelo conceptual

Suministro de nutrientes del muestreo inicial. El P en solución constituye la fracción disponible del elemento, que está en equilibrio directo con el P lábil y este a su vez con el P no lábil (Sharpley, 2000). En el N la fracción disponible se debe a la mineralización del N orgánico de residuos y de los compuestos estabilizados por la protección física y química de las arcillas, lo que implica que eventualmente puede no haber un suministro suficiente de N para el cultivo (Yousaf et al., 2017). El suministro de K depende de la eficiencia de aprovechamiento del nutriente por el cultivo y de la naturaleza y cantidad de arcillas. Los valores en la tabla 8 se utilizaron para calcular con la ecuación 1 la dosis de fertilización más adecuada para el cultivo. Valadez (2001) indica que el chile tiene resistencia moderada a la acidez y que se puede desarrollar adecuadamente en suelos con pH de 5.5 a 6.8. Aunque el suelo presentó un pH ligeramente mayor, se observaron desarrollo y rendimiento aceptables. Mahdi et al. (2012) señalan que parte del P de la fertilización puede precipitarse sin llegar a la solución, al quedar parte en la fuente lábil y parte en la no lábil.

Suministro de nutrientes del muestreo final. El suministro de P por el suelo fue mayor en T3, seguido de T2 y T1, aunque las diferencias no son sustanciales (tabla 9). Ese comportamiento se observó también en el N total e inorgánico, Mg, Fe, Cu y Mn, aunque

esas diferencias no son atribuibles a los tratamientos. En el resto de nutrientes no se observó una tendencia creciente o decreciente por tratamiento.

Demanda de nutrientes por el cultivo. No se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para ningún nutriente en ninguno de los componentes, ni para la demanda total de cada uno (tabla 10), resultados consistentes con los obtenidos en el crecimiento y rendimiento del cultivo: la falta de diferencias en la demanda es un indicador de que el cultivo fue abastecido de nutrimentos en los tres tratamientos, incluyendo al P. Los valores del suministro de macronutrientes N, P y K aportado por la fertilización (tabla 9) superaron con mucho los de la demanda del cultivo (tabla 11). Consecuentemente, los resultados obtenidos en el crecimiento y rendimiento del cultivo no fueron diferentes entre tratamientos.

Dosis de fertilización. La dosis de fertilización obtenida es válida para la parcela experimental. La dosis a aplicar en otra puede estimarse realizando un muestreo y un análisis químico del suelo, que permita determinar su suministro de nutrientes. Posteriormente se puede aplicar la ecuación 1 con los valores de la demanda por nutriente obtenidos en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

No se observaron diferencias en el suministro de macronutrientes del suelo para los tres tratamientos de fertilización evaluados, lo que se atribuye al exceso de fertilizantes aplicados al cultivo por

los productores. El P adicionado se precipitó al mantenerse en solución una cantidad similar en cada tratamiento. Tampoco hubo diferencias estadísticas en la cantidad de dicho elemento y macronutrientes que son absorbidos por la planta de chile habanero en los diferentes tratamientos, ni en las variables de crecimiento y rendimiento evaluadas.

Se realizó una estimación de la demanda máxima de P y macronutrientes en el cultivo de chile habanero, verificándose la hipótesis de trabajo. La demanda fue utilizada para calcular con el método conceptual la dosis de fertilización recomendable para el cultivo, aplicable en la parcela experimental. Con base en la estimación de la demanda máxima de macronutrientes obtenida en el presente estudio se puede estimar la dosis de fertilización sustentable a aplicar en el cultivo en cualquier parcela, previo análisis químico del suelo.

Dado que la demanda de P y demás macronutrientes por el cultivo fue plenamente satisfecha por el suministro del suelo, se concluye que el rendimiento máximo alcanzable de chile habanero en la zona es el que se obtuvo en esta evaluación.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Conacyt por becar al primer autor en estudios de Maestría en Ciencias, al presidente del sistema producto chile en Campeche, Ing. Russell Escalante Rodríguez y al productor MAP. Francisco Góngora Ramírez, por las facilidades otorgadas para realizar el trabajo.

REFERENCIAS

- Avilés, W., Dzib, R., & Pereyda, G. (2010). *Manual para la producción de chile habanero Capsicum chinense Jacq. en Yucatán a campo abierto y bajo estructuras de protección* (Folleto Técnico No. 7). Mérida, Yucatán, México: INIFAP.
- Batjes, N. H. (2011). *Global distribution of soil phosphorus retention potential* (ISRIC Report 2011/06, 42 pp.). Wageningen, Holanda: ISRIC World Soil Information.
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (31 de mayo de 2017). *Chile habanero, con denominación de origen* [Blog gubernamental]. Recuperado de <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-habanero-con-denominacion-de-origen?idiom=es>.
- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (2ª. ed.). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mahdi, S. S., Talat, M. A., Hussain Dar, M., Hamid, A., & Ahmad, L. (2012). Soil phosphorus fixation chemistry and role of phosphate solubilizing bacteria in enhancing its efficiency for sustainable cropping-A review. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 6(4): 1905-1911.
- McKean, S. J. (1993). *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal. Una guía teórica y práctica de metodologías* (Documento de trabajo No. 129, 100 pp.). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Naeem, A., Akhtar, M., & Ahmad, W. (2013). Optimizing available phosphorus in calcareous soils fertilized with diammonium phosphate and phosphoric acid using Freundlich adsorption isotherm. *Scientific World Journal*, 680257. doi: 10.1155/2013/680257
- Rodríguez, S. J. (1990). *Fundamentos de fertilidad de cultivos*. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). *Agenda Técnica Agrícola de Campeche* (2ª. ed., ISBN 978-607-7668-42-8, 186 pp.). México: Autor.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019). [Portal electrónico gubernamental]. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>
- Sharpley, A. (2000). Phosphorus availability. En: M. E. Sumner, P. Ming Huang, & Y. Li (Eds.), *Handbook of Soil Science: Properties and Processes* (pp. D18-D37). New York: CRC Press.
- Tukey, J. W. (1991). The philosophy of multiple comparisons. *Statistical of Science*, 6(1), 100-116.
- Tun, D. J. C. (2000). *Aplicación de fertilizantes a través del agua de riego a hortalizas y frutales, mediante sistemas de riego presurizado. Informe Final*. Mocochoá, Yucatán, México: INIFAP Campo Experimental Zona Henequenera.
- Valadez, L. A. (2001). *Producción de hortalizas* (9ª. ed.). México: Editorial Limusa.
- Yousaf, M., Li, J., Lu, J., Ren, T., Cong, R., Fahad, S., & Li, X. (2017). Effects of fertilization on crop production and nutrient-supplying capacity under rice-oilseed rape rotation system. *Scientific Reports* 7, 1270. doi: 10.1038/s41598-017-01412-0