



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

Plan de nutrición para frijol ejotero *Phaseolus vulgaris*
L. (var Strike) en dos tipos de suelo Vertisol y Luvisol

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

P R E S E N T A:

LUCERO MENDOZA ALVARADO

ASESORA: DRA. MARTHA ELENA DOMÍNGUEZ HERNÁNDEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN**

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDEERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Plan de nutrición para el frijol ejotero Phaseolus vulgaris L. (var. Strike) en dos tipos de suelo
Vertisol y Luvisol.**

Que presenta la pasante: **Lucero Mendoza Alvarado**

Con número de cuenta: **312254951** para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de abril de 2022.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Arturo Aguirre Gómez	
VOCAL	M. en C. Vicente Silva Carrillo	
SECRETARIO	Dra. Martha Elena Domínguez Hernández	
1er. SUPLENTE	M. en C. Juan Roberto Guerrero Agama	
2do. SUPLENTE	Ing. Fernando Ortiz Salgado	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm*

*“No te rindas que la vida es eso,
continuar el viaje,
perseguir tus sueños,
destrabar el tiempo,
correr los escombros y destapar el cielo.”*

-Mario Benedetti.

DEDICATORIA

A mi mamá, este es un logro de ella, muchas gracias.

A mis hermanos por el cariño y apoyo incondicional.

A mis amigos por estar siempre ahí y hacerlo más divertido.

A la familia Fernandez del Castillo Sodi por todo su apoyo.

*A la Maestra Laura, por la extraordinaria pasión por el conocimiento y enseñanza,
infinitas gracias.*

*A cada una de las personas que han patrocinado mi educación, sin cada uno de ellos este
pequeño paso no sería posible.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y la beca otorgada por el Programa Universitario de Estudios de la Diversidad Cultural y la Interculturalidad, por darnos la visibilidad a los que conformamos este país multicultural.

Estoy infinamente agradecida con mi *alma mater* por cada una de las oportunidades que me brindó para desarrollar mis habilidades académicas, profesionales y personales y por darme las llaves del mundo.

A todos y cada uno de mis profesores que me enseñaron a sembrar semillas de conciencia, para cosechar nuevas sociedades.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	4
CAPITULO 1. MARCO DE REFERENCIA.....	5
1. Características e importancia de suelo Vertisol y Luvisol	5
1.1. Características principales de suelo Vertisol	5
1.2. Características principales de suelo Luvisol.....	6
1.3. Localización geográfica de los suelos Vertisol y Luvisol en México	6
2. Importancia de la fertilización.....	9
2.1. Consideraciones para el manejo eficiente de la fertilización.....	9
2.2. Enfoques para generar recomendaciones de fertilización.....	11
2.3. Dosis regional para el cultivo de ejote.....	12
2.4. Método Sistémico Racional	12
2.5. Muestreo	15
2.6. Análisis de suelo y sus variables.....	17
2.6.1. Interpretación del análisis de suelo.....	18
2.6.2. Materia Orgánica (MO).....	18
2.6.3. Densidad	19
2.6.4. pH	20
2.6.5. Conductividad eléctrica (CE)	20
2.6.6. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	21
2.6.7. Bases de intercambio catiónico del suelo	22
2.6.8. Elementos esenciales para el crecimiento vegetal.....	23
2.6.9. Carbonatos de calcio.....	27
2.6.10. Aluminio (Al)	27
2.7. Buenas prácticas de fertilización “4R”	28
2.7.1. Dosis correcta (Right rate).....	28
2.7.2. Momento correcto (Right time).....	29
2.7.3. Lugar correcto (Right Place)	30

2.7.4.	Fuente correcta (Right source)	33
3.	Cultivo de ejote.....	36
3.1.	Importancia del cultivo	36
3.1.1.	Importancia mundial.....	36
3.1.2.	Importancia nacional	38
3.1.3.	Frijol ejotero en el Estado de México.....	39
3.2.	Descripción botánica.....	41
3.2.1.	Tallo.....	41
3.2.2.	Hojas.....	42
3.2.3.	Flor	42
3.2.4.	Fruto	42
3.2.5.	Semilla.....	42
3.2.6.	Habito de crecimiento.....	42
3.2.7.	Fenología del cultivo	44
3.2.8.	Variedades de frijol ejotero más utilizadas	45
3.3.	Manejo agronómico del ejote.....	45
3.3.1.	Requerimientos edafoclimáticos.....	45
3.3.2.	Preparación del terreno	47
3.3.3.	Siembra.....	47
3.3.4.	Dosis de fertilización recomendada para frijol ejotero.....	47
3.3.5.	Demanda nutrimental del cultivo	48
4.	Variables que afectan el rendimiento y desarrollo en el ejote.....	50
CAPITULO 2. METODOLOGÍA.....		52
5.	Ubicación del ensayo.....	52
6.	Cultivar utilizado	52
7.	Características climáticas de la zona	52
8.	Análisis de los suelos.....	52
9.	Determinación de la dosis de fertilización	53
10.	Diseño experimental	54
11.	Plan de manejo del cultivo y elaboración de calendario fenológico del ejote.....	55
12.	Análisis estadístico	56
CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		57

13.	Resultados del análisis de suelo e interpretación.....	57
13.1.	Análisis químico del suelo Vertisol	57
13.2.	Análisis químico del suelo Luvisol	59
13.3.	Cálculo de la demanda	61
13.4.	Cálculo del suministro en suelo Vertisol y Luvisol	62
13.5.	Cálculo de la dosis de fertilización	64
13.6.	Selección de fertilizantes.....	65
14.	Fenología del cultivo	66
15.	Discusión. Variables que afectaron el rendimiento del frijol ejotero	69
15.1.	Efecto de la luz en invernadero de cristal y cubierta plástica.	69
15.2.	Efecto del fotoperiodo	72
15.3.	Efecto de la temperatura.....	72
15.4.	Daño por enfermedades y plagas	73
15.5.	Efecto de las condiciones de la cubierta plástica	73
16.	Rendimiento	74
16.1.	Rendimiento de ejote en suelo Vertisol.....	74
16.2.	Rendimiento de ejote en suelo Luvisol	76
16.3.	Diferencias entre ambos suelos	78
CAPITULO 4. CONCLUSIONES		80
ANEXOS		83
Anexo 1. Cálculos para obtener cantidad de materia orgánica a añadir		83
Anexo 2. Datos para el cálculo de dosis fertilización.....		83
Anexo 3. Cálculo de la dosis de fertilización para el suelo Vertisol		84
Anexo 4. Cálculo de la dosis de fertilización para el suelo Luvisol.....		85
Anexo 5. Resultado del análisis de suelo.....		86
REFERENCIAS		87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índices agronómicos para la eficiencia de uso de nutrientes.....	15
Tabla 2. Niveles de materia orgánica	19
Tabla 3. Densidad aparente del suelo de acuerdo con la textura.....	19
Tabla 4. Rangos de pH para suelos.....	20
Tabla 5. Interpretación de CE.....	21
Tabla 6. Rangos típicos de CIC para diferentes texturas de suelo	22
Tabla 7. Niveles de CIC y su relación con la disponibilidad de nutrientes.....	22
Tabla 8. Interpretación de resultados de bases intercambiables; Ca, Mg y K.....	23
Tabla 9. Interpretación del contenido de N	24
Tabla 10. Interpretación del contenido de P.....	24
Tabla 11. Interpretación de resultados de contenido de B.....	25
Tabla 12. Interpretación de contenido de micronutrientes	26
Tabla 13. Interpretación de resultados para el contenido de CaCO ₃ . Por el método de neutralización ácida	27
Tabla 14. Niveles críticos de Al ⁺	28
Tabla 15. Características de algunos fertilizantes	35
Tabla 16. Hábitos de crecimiento del frijol.	43
Tabla 17. Tolerancia del frijol a la salinidad, y su relación con porcentajes de disminución de rendimientos.	46
Tabla 18. Dosis de fertilización empleada en el Estado de México.	48
Tabla 19. Coeficiente de extracción de N del ejote.....	48
Tabla 20. Extracciones totales de nutrientes en ejote.....	49
Tabla 21. Contenido nutrimental encontrados en los tejidos (base peso seco) de varios cultivos vegetales.....	49
Tabla 22. Dosis de fertilización calculada para Vertisol.....	54
Tabla 23. Dosis de fertilización calculada para Luvisol.....	54
Tabla 24. Calendario de actividades previstas.....	55
Tabla 25. Contenido nutricional de suelo Vertisol.....	58
Tabla 26. Características químicas de suelo Vertisol.....	59

Tabla 27. Contenido nutricional de suelo Luvisol.....	60
Tabla 28. Características químicas de suelo Luvisol.....	61
Tabla 29. Demanda del cultivo de frijol ejotero.....	62
Tabla 30. Contenido de N-P-K.....	63
Tabla 31. Contenido de N, P y K en un suelo Luvisol y un Vertisol.	63
Tabla 32. Requerimiento de NPK para el suelo Vertisol	64
Tabla 33. Requerimiento de NPK para el suelo Luvisol	64
Tabla 34. Dosis de fertilización para cada tratamiento en suelo Vertisol y Luvisol	65
Tabla 35. Fertilizantes empleados en el ensayo.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Superficie de los principales tipos de suelo en México	7
Figura 2. Distribución de suelos Vertisol y Luvisol en México y el Edo. de México.....	8
Figura 3. Formula general de dosis de fertilización.	14
Figura 4. Procedimiento para la extracción de una muestra de suelo (En línea: www.fagro.edu.uy)	17
Figura 5. Principales productores mundiales de ejote (FAOSTAT, 2019).	37
Figura 6. Rendimiento promedio de los principales productores mundiales de ejote (FAOSTAT, 2019)	37
Figura 7. Distribución de la superficie cultivada con ejote en México en hectáreas (SIAP, 2018).....	38
Figura 8. Rendimiento promedio por estado productor de ejote (SIAP, 2018).....	39
Figura 9. Superficie cultivada con frijol ejotero del periodo de 2008 a 2018) en el Estado de México (SIAP, 2018).....	40
Figura 10. Rendimiento promedio de frijol ejotero en el Estado de México del período de 2008 a 2018 (SIAP, 2018).....	40
Figura 11. Fenología del frijol ejotero (Virgilio, 2003).	45
Figura 12. Fenología de ejote durante el ensayo y su comparación con un comportamiento fenológico promedio.....	68

Figura 13.Comparación del desarrollo del ejote en invernadero de cristal y en cubierta plástica.....	71
Figura 14. Síntomas de virosis en hoja de ejote.	73
Figura 15. Variables evaluadas por planta de frijol ejotero en suelo Vertisol.....	75
Figura 16. Variables evaluadas por planta de frijol ejotero en suelo Luvisol.	77
Figura 17. Peso fresco de vainas de frijol ejotero por cada tipo de suelo	79
Figura 18. Peso seco de frijol ejotero por cada tipo de suelo	79

RESUMEN

Los suelos Vertisoles (9%), Luvisoles (9%) representan el 18% de la superficie en México, en su mayoría son utilizados para actividades agrícolas, ambos tipos de suelo se pueden encontrar en el Estado de México donde las prácticas de dosis de fertilización frecuentemente se basan en recomendaciones regionales, sin el uso de análisis químicos para conocer el estado nutricional del suelo, perpetuando un manejo inadecuado de la fertilidad del suelo, situación que a futuro puede ocasionar pérdida de fertilidad, por lo tanto existe la necesidad de implementar sistemas de producción sostenibles que impliquen prácticas como el análisis de suelo y planes de nutrición adaptado a características del suelo y cultivos.

Por lo antes mencionado el objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento obtenido de ejote (*Phaseolus vulgaris*) var. Strike, basado en el cálculo de la dosis de fertilización por el Método Sistemático Racional para los suelos antes mencionados. Se estableció un experimento de bloques completamente al azar para cada tipo de suelo en macetas de 4.4 L, cada una con dos plantas de frijol ejotero, con 4 repeticiones para los tratamientos y 2 repeticiones para los testigos. Los tratamientos para cada suelo fueron: tratamiento testigo sin la adición de fertilizantes (T0), tratamiento uno con la dosis de fertilización calculada (T1, para el Vertisol 21-58-152 y para el Luvisol 00-136-214) y tratamiento dos con 1.5 veces la dosis de fertilización calculada (T2, para el Vertisol 32-87-228 y para el Luvisol 00-204-321) en N-P₂O₅-K₂O₅. Las variables que se evaluaron fueron; número, longitud, peso fresco y seco de vainas, altura de planta, y el desarrollo fenológico del cultivo. Los factores como la estación del año (otoño-invierno), condiciones de la cubierta plástica donde se estableció el ensayo, la aparición de plagas, enfermedades y las características propias de suelo influyeron en los resultados. Se obtuvo un rendimiento bajo en ambos suelos y en los diferentes tratamientos, no se alcanzó el rendimiento meta de 10 t ha⁻¹ que era equivalente a 260g maceta⁻¹, sin embargo, las plantas testigo de suelo Luvisol fueron las que alcanzaron el mayor rendimiento con 23.05 g planta⁻¹.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés por el ajuste de la dosis de fertilizantes ha aumentado en los sistemas de producción, debido entre varios a factores al aumento del costo de insumos y al impacto ambiental de una aplicación excesiva provocando deterioro a mediano plazo de los sistemas de producción.

La Organización de las Naciones Unidas plantea 17 objetivos en la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, estos objetivos abarcan los aspectos económicos, sociales y ambientales. En tres de los objetivos se contemplan aspectos relacionados directamente con la conservación y manejo de suelos que son los siguientes, objetivo 2 “poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria, una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible”; objetivo 12 “garantizar las pautas de consumo y de producción sostenibles; y el objetivo 15 “vida de ecosistemas terrestres, que promueve la lucha contra la desertificación, degradación y deforestación”.

En estos objetivos vienen implícito el uso eficiente de insumos para la agricultura, y, por lo tanto, se debe promover un uso racionado y necesario de estos para la producción agrícola, como el agua y los fertilizantes, para tener un menor impacto en el ambiente. En concreto se trata de reducir y optimizar el uso de insumos y recursos mediante un enfoque sistémico, equilibrar el ecosistema, para evitar la pérdida de fertilidad del suelo, la liberación de gases de efecto invernadero a la atmosfera y la contaminación de masas de agua (ONU, 2019).

El éxito en el manejo de la fertilidad del suelo depende en gran parte de la pertinencia y precisión con la que se diseñe un plan o programa de diagnóstico del estado nutricional del suelo. En efecto el diagnóstico de aspectos químicos de la fertilidad se encarga de brindar información del potencial que posee un suelo para poder abastecer en tiempo y forma de nutrimentos que requiere un cultivo (Etchevers y Padilla, 2012).

De esta forma, el diagnóstico de la fertilidad permite identificar problemas de carácter nutrimental, que puedan afectar el desarrollo del cultivo, sin embargo, no debe de olvidarse que los problemas nutrimentales son solo una parte del conjunto de factores que intervienen en la producción de un cultivo.

La cantidad correcta de fertilizantes que se debe aplicar a un cultivo es de las principales decisiones a tomar en cuenta antes de establecerlo, para así asegurar el rendimiento o resultado esperado y por tanto sea económicamente rentable. La dosis adecuada de fertilizantes asegura la estabilidad de suelo de donde las plantas obtienen los elementos minerales para su nutrición.

En México, la mayoría de los pequeños productores no implementa técnicas para el conocimiento del estado nutricional del suelo cultivado, ya sea por falta de dinero, o por desconocimiento, lo que conlleva a que sus prácticas de aplicación de fertilizantes sean basadas en recomendaciones locales de casas de venta o de compañeros agricultores.

La producción de hortalizas, en particular el ejote, en el estado de México, abarca relativamente un bajo porcentaje de área cultivada con menos de 5 ha para el 2018, este cultivo se puede encontrar en regiones del estado donde el tipo de suelo son Vertisoles y Luvisoles.

El rendimiento promedio nacional es de $7.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en temporal y $9.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ bajo riego, según datos del SIAP (2019) y donde Sinaloa es el estado con mayor producción con $14 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en promedio; este último dato supera al rendimiento promedio óptimo $9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. El bajo rendimiento que se obtiene puede deberse al manejo inapropiado del cultivo, en el que se incluye un plan inadecuado de fertilización y la falta de adaptación de las variedades utilizadas (Salinas-Ramírez *et al.*, 2012).

En este trabajo se buscó comparar si estos tipos de suelo tienen un efecto diferente en el rendimiento y desarrollo de frijol ejotero, basado en El Método Sistemático Racional de fertilización en un mismo ambiente.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la dosis de fertilización adecuada para el cultivo de frijol ejotero variedad Strike para un suelo Vertisol y otro Luvisol por El Método Sistemico Racional.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Determinar el contenido de N-P-K de cada suelo, Vertisol y Luvisol, para poder calcular el suministro que se requiere para el desarrollo del cultivo de frijol ejotero.
- Determinar las características físicas y químicas de ambos suelos, requeridas, para evaluar su influencia en los componentes de rendimiento de las plantas de ejote.
- Obtener la dosis de fertilización para frijol ejotero variedad Strike por el Método Sistemico Racional para cada uno de los suelos mencionados.
- Observar la respuesta fenológica y agronómica del ejote en ambos suelos e identificar cuál es el más apto para el cultivo.
- Determinar la dosis de fertilización que tenga el mayor rendimiento del cultivo de ejote variedad Strike en cada tipo de suelo, empleando los tratamientos siguientes; Tratamiento uno, T1: fertilización a partir de los cálculos de demanda del cultivo; Tratamiento 2, T2: 1.5 veces la dosis del tratamiento uno.

CAPITULO 1. MARCO DE REFERENCIA

1. Características e importancia de suelo Vertisol y Luvisol

1.1. Características principales de suelo Vertisol

Los Vertisoles (del latín *verteré*, invertir) son suelos muy comunes de climas semiáridos a subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias, se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada (SEMARNAT, 2015).

Son suelos arcillosos pesados con una alta porción de arcillas expansivas, tienen grietas profundas y anchas en algunas ocasiones durante el año que pueden llegar a los 100 cm de profundidad. El suelo superficial cae en las grietas y el suelo subterráneo es empujado hacia arriba, denominado pedoturbación, que provoca una mezcla del suelo de la superficie y material del subsuelo (FAO, 2001). Esta propiedad hace que, aunque son muy fértiles, también sean difíciles de trabajar debido a su dureza durante el estiaje y a que son muy pegajosos durante las lluvias y con alto riesgo de salinización (World Reference Base for Soil Resources, 2007). Los suelos Vertisoles forman un orden de suelos relativamente homogéneo debido a la cantidad y al tipo de arcilla que les es común (Chesworth, 2008).

La mayoría de los Vertisoles son adecuados para la agricultura mecanizada si hay mucha lluvia o agua de riego y si se siguen las prácticas de manejo adecuadas. Este tipo de suelo generalmente se encuentran en zonas con pendientes suaves, y pocas pendientes pronunciadas, sin embargo, grandes áreas con suelo tipo Vertisol en el mundo no se cultivan, porque su manejo requiere demasiado consumo de energía, especialmente donde se usan métodos tradicionales de bajo potencial. Esta es una de las limitaciones básicas del uso de Vertisoles. La irrigación también presenta problemas especiales debido a su baja conductividad hidráulica saturada (Eswaran y Reich, 2005).

La WRB (World Reference Base for Soil Resources) y la USDA (United States Department of Agriculture) clasifican como Vertisol a los suelos con las características antes mencionadas (Kutilek y Nielsen, 2015).

1.2. Características principales de suelo Luvisol

Los Luvisoles (del latín *luere*, lavar) son suelos que se forman a partir de una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales (SEMARNAT, 2015).

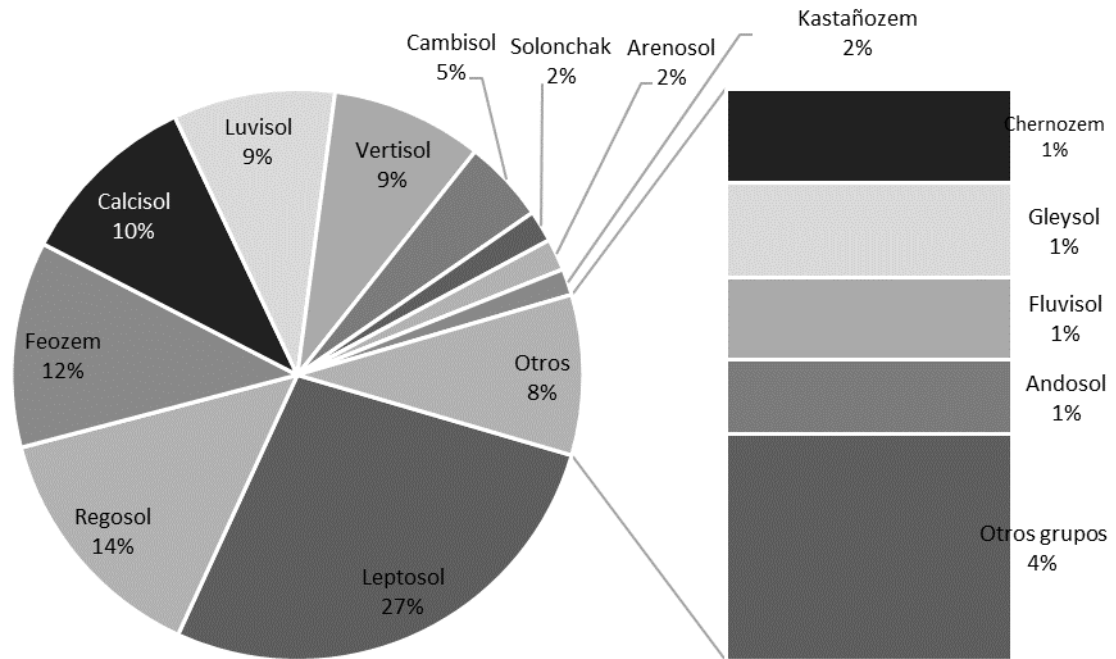
Son suelos en los que la arcilla de alta actividad ha migrado desde la parte superior del perfil, generalmente de color grisáceo, para depositarse en un horizonte B árgico subsuperficial, que tiene un contenido en arcilla mayor que el horizonte situado encima, comúnmente de un tono más marrón. Químicamente los materiales parentales son ricos en bases intercambiables (FAO, 2001).

La mayoría de los Luvisoles son suelos fértiles y adecuados para una amplia gama de usos agrícolas. Si presentan un alto contenido de limo son susceptibles al deterioro de la estructura cuando se labra el suelo mojado o con maquinaria pesada, en pendientes pronunciadas requieren medidas de control de erosión (FAO, 2006). Por lo general, se encuentran en zonas planas o de pendientes suaves en regiones con climas templados y fríos o en zonas cálidas húmedos con marcada estacionalidad de lluvia y sequía (Chesworth, 2007).

En la taxonomía de USDA los Luvisoles son clasificados dentro del grupo de los Alfisoles (Kutílek y Nielsen, 2015) y en la WRB es un grupo.

1.3. Localización geográfica de los suelos Vertisol y Luvisol en México

De acuerdo con el INEGI (2007), en México existen 26 de los 32 grupos de suelos reconocidos por el WRB, predominando los leptosoles, regosoles, feozems, calcisoles, Luvisoles y Vertisoles, que en conjunto, ocupan 81.6% de la superficie nacional (Figura 1).



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI. Conjunto de Datos Vectorial Edafológica. Serie II, escala 1:250 000. INEGI. México. 2007.

Figura 1. Superficie de los principales tipos de suelo en México

De las seis unidades de suelo dominantes en México, tres tienen características que las vuelven apropiadas para su aprovechamiento agrícola: los Luvisoles, Vertisoles y Feozems. La superficie conjunta de estos suelos que está dedicada a labores agropecuarios ha crecido significativamente en las últimas décadas (SEMARNAT, 2015).

Los Vertisoles a nivel mundial ocupan alrededor de 335 millones de hectáreas, en México cubren 16.5 millones de hectáreas y ocupan gran parte de los principales distritos de riego en Sinaloa, Sonora, Guanajuato, Jalisco, Tamaulipas y Veracruz, Figura 1 (SEMARNAT, 2015).

Los Luvisoles se extienden por alrededor de 500 a 600 millones de hectáreas en el mundo y en México en 1.7 millones de hectáreas, siendo la sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca, Campeche y la Península de Yucatán, algunas de sus zonas de distribución (Figura 2).

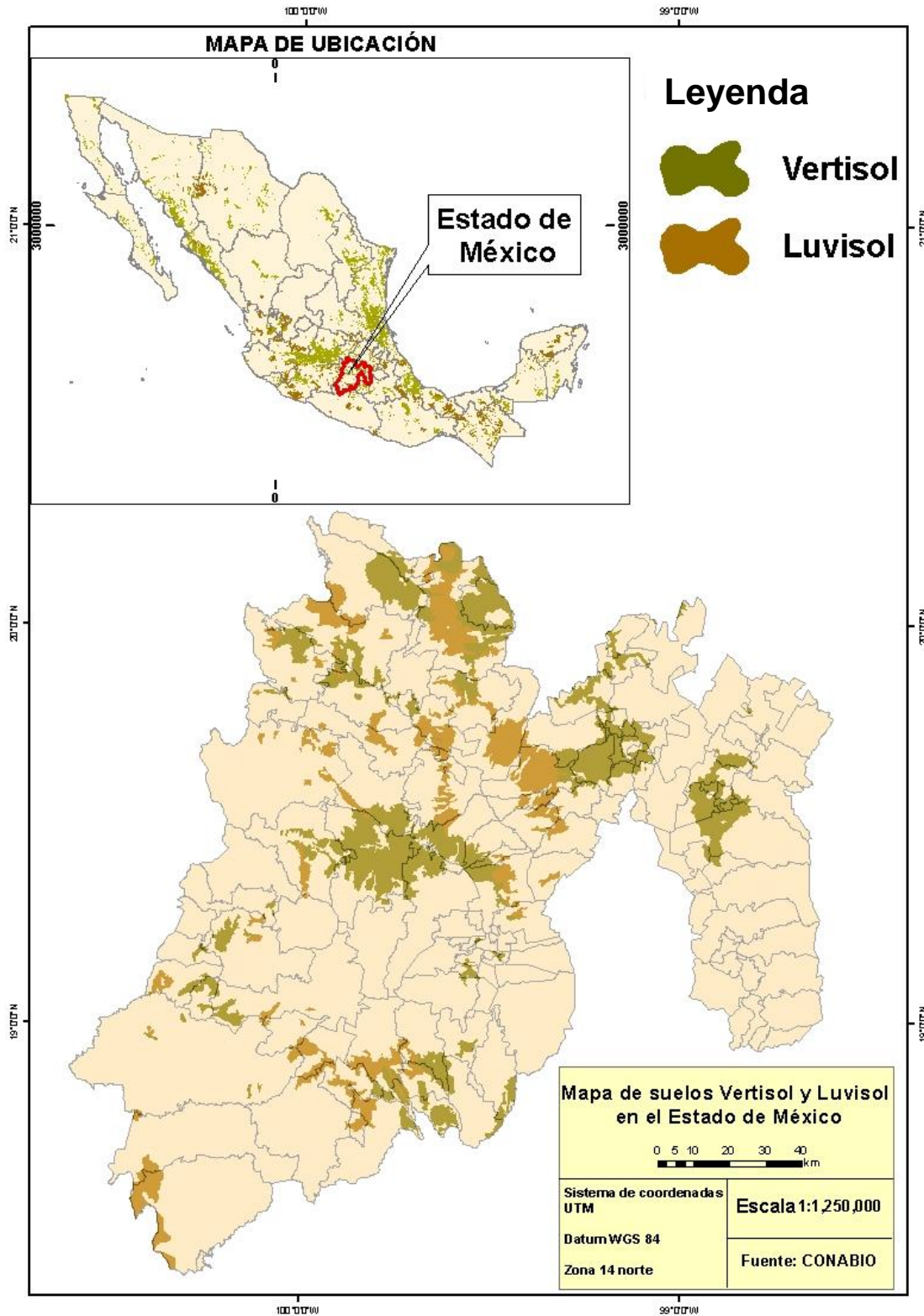


Figura 2. Distribución de suelos Vertisol y Luvisol en México y el Edo. de México

2. Importancia de la fertilización

Con una población mundial en constante crecimiento, es importante producir suficientes cultivos cada año para proporcionar alimentos, ropa y otros productos agrícolas a la población mundial. Los diversos cultivos agotan los nutrientes del suelo de diferentes formas y ritmos. Los fertilizantes proveen nutrientes que los cultivos necesitan, con el fin de producir más alimentos y de mejor calidad, pueden mejorar la baja fertilidad de los suelos que han sido sobreexplotados cuando existe un desequilibrio nutritivo en él, ya sea por la extracción de las plantas o por las propias características del suelo (Guzmán y López, 2004).

La fertilidad de suelo se entiende entonces como su capacidad para suministrar todos y cada uno de los nutrientes que necesitan las plantas en cada momento, en la cantidad necesaria y en forma asimilable. La asimilación de los elementos nutritivos también depende del clima, la genética de la planta, su estado de desarrollo, de las propiedades físicas y químicas del suelo y de las prácticas culturales (García-Serrano, 2010).

2.1. Consideraciones para el manejo eficiente de la fertilización

La demanda de un nutrimento de un cultivo está dada por su producción de biomasa y la concentración de nutrimentos en su planta. La concentración mínima de un elemento en la planta, para alcanzar el rendimiento máximo posible en una condición dada, a esto se le llama requerimiento interno o demanda, por otro lado, el requerimiento interno puede ser diferente a la demanda. El requerimiento interno es independiente del rendimiento potencial que se alcanza bajo distintas condiciones de suelo y clima, siempre que no existan limitaciones de manejo (Etchevers *et al.*, (1991) citado por Haller *et al.*, 1998).

La producción de biomasa se puede estimar en la práctica a partir de “la proporción del producto de interés económico” (grano, biomasa aérea, fruto, etc.) y del índice de cosecha, dados por la relación entre el producto de interés y la biomasa producida (Haller *et al.*, 1998).

Disponer de información sobre absorción y extracción de nutrientes en los cultivos es esencial para la planificación de esquema de fertilización y la toma de decisiones en el cultivo. Un concepto importante que se debe recordar para evaluar los requerimientos de

nutricionales es la diferencia terminológica entre las palabras “absorción” y “extracción” de los cultivos. Se entiende por absorción a la cantidad total de nutrientes absorbidos por el cultivo durante su ciclo de desarrollo y el termino extracción se refiere a la cantidad total de nutrientes en los órganos cosechados, grano, forraje u otros. La diferencia entre los términos es significativa al momento de las recomendaciones de fertilización, bajo el criterio de reposición. La reposición utilizando la absorción del cultivo implica la aplicación de todos los nutrientes que fueron tomados por el cultivo y que se encuentran presente en todos sus tejidos y órganos, cosechables y no cosechables. Sin embargo, la práctica de fertilización por niveles de extracción de los cultivos, generalmente la más empleada, solo busca reponer los nutrientes que son absorbidos y depositados en tejidos y órganos cosechables y por tanto no son reciclados, debido a que no vuelven a ingresar al sistema suelo cuando no se realiza una reincorporación; por el contrario, si se deja el rastrojo solo una porción de los nutrientes vuelve al suelo. Los requerimientos nutricionales de los cultivos varían con el nivel de producción, variedad, fertilización, tecnología de manejo de cultivos, suelo, clima y ambiente (Ciampitti y García, 2007).

De acuerdo con Segura-Pérez y Contreras-París (2015), para ajustar las aportaciones de fertilizantes a las necesidades de nutrientes de los cultivos es importante tener en cuenta tres conceptos relacionados con la nutrición vegetal:

- Absorción de nutrientes: hace referencia a la cantidad total de nutrientes que el cultivo absorbe durante su ciclo de desarrollo. Se consideran los nutrientes acumulados en los órganos cosechados (frutos) y no cosechados (raíz, tallo, y hoja) para cultivos hortofrutícolas.
- Extracción de nutrientes: corresponde a la cantidad de cada uno de los nutrientes que la planta absorbe y que son retirados del sistema a través de la recolección de frutos y de restos vegetales en caso de que no haya reincorporación al suelo al final de ciclo del cultivo. Cuando no ocurre lo antes mencionado, las extracciones se pueden considerar equivalente a la absorción de nutrientes por la planta, los nutrientes presentes en la raíz que se quedan en el suelo representan menos del 10% de total absorbido. La fertilización basada en las extracciones de nutrientes de la planta está orientada a reponer los nutrientes consumidos por el cultivo, para obtener un balance

final en el que la entrada de nutrientes al suelo sea igual a la salida y así mantener la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de sistema productivo. Al momento de realizar las recomendaciones de fertilización para un determinado cultivo, la reposición de nutrientes utilizando la absorción del cultivo implica el aporte de todos los nutrientes que fueron absorbidos por la planta (incluye los nutrientes contenidos en la cosecha y en los restos de cultivo). La práctica de fertilización basada en los niveles de extracción tiene como objetivo reponer los nutrientes que han sido sustraídos y no vuelven a ingresar al suelo.

- Consumo de lujo: se produce cuando el cultivo absorbe nutrientes sin tener un aumento correspondiente en la producción, es decir la planta continúa absorbiendo elementos, pero no aumenta sus rendimientos, por lo tanto, existe un aporte excesivo o gasto extra de fertilizantes.

2.2. Enfoques para generar recomendaciones de fertilización

De acuerdo con Haller *et al* (1998), existen diferentes enfoques para generar una recomendación de fertilización para los cultivos, estos son descritos a continuación.

- Media regional: se basa en la media que los productores de un mismo cultivo utilizan en la región donde se encuentran.
- Estratificación por el ambiente:
 - a) Agroecosistemas: se basa en la información sobre la respuesta del cultivo a los fertilizantes, que se obtiene directamente de las siembras de los agricultores, este enfoque es el que predomina en México. No considera las variaciones de los contenidos nutrimentales del suelo dentro del agroecosistema, debido a que este enfoque requiere de experimentación de campo durante cierto número de años, presenta la desventaja de ser costoso y de necesitar periodos relativamente largos para alcanzar una aproximación aceptable de las dosis de fertilización, sin que posteriormente exista un ajuste de las variaciones de los contenidos nutrimentales del suelo.
 - b) Agrohábitats: utiliza información de siembras de agricultores, puede constituir una opción más barata y rápida para generar recomendaciones de fertilización; sin

embargo, requiere cumplir con algunas condiciones para su mejor funcionamiento como considerar un tamaño de muestras que incluya adecuadamente las variaciones de suelo, clima y manejo presente en la región e incluir el análisis del suelo.

- Balance nutrimental o Método Sistémico Racional: se basa en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo y el suministro del nutrimento por el suelo, de tal manera, que cuando la demanda es mayor que el suministro, se producirá un déficit del nutrimento que es necesario suplir con fertilizantes.

2.3. Dosis regional para el cultivo de ejote

En el estado de México el cultivo de frijol ejotero abarca en promedio 4.1 hectáreas, lo que representa escasa superficie cultivada. El instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX, 2020), reporta que la fertilización de ejote regional para el Estado de México es de 40-40-30 kg ha⁻¹ (N-P-K) para ser aplicado durante la siembra. El último dato mencionado sirve como referencia para comparar la dosis regional y la que se calcule en el presente trabajo.

2.4. Método Sistémico Racional

El Método Sistémico Racional se basa en conocer el coeficiente de extracción de cada cultivo (kilogramos de cierto elemento para producir una tonelada de cosecha). Para calcular el coeficiente de extracción se realiza una interpretación entre rendimientos del cultivo, teniendo en cuenta que para rendimientos máximos el valor del coeficiente de extracción considerado será el mínimo y viceversa, pues cuando menor es el rendimiento, a igual cantidad de elementos aportado en la fertilización, mayor disponibilidad tiene la planta y mayor cantidad extrae. Estos valores y datos se pueden hallar en diversa bibliografía (IDEA, 2007).

Cada cultivo requiere de cantidades específicas de nutrientes, la cantidad de nutrientes necesaria depende en gran parte del rendimiento obtenido (o esperado) del cultivo. Las diferentes variedades de un cultivo también diferirán en sus requerimientos de nutrientes y

su respuesta a los fertilizantes. Una variedad local no responderá tan bien a los fertilizantes como una variedad mejorada; por ejemplo, el maíz híbrido dará a menudo una mejor respuesta a los fertilizantes y producirá rendimientos mucho más altos que las variedades locales.

Aunque las cifras dadas por el coeficiente de extracción son una primera buena indicación de las necesidades de nutrientes de las plantas al respectivo nivel de rendimiento, otros factores deben ser tomados en cuenta para determinar el requerimiento real del fertilizante, por ejemplo, las reservas de nutrientes del suelo, así como una posible indisponibilidad de los nutrientes aplicados a las raíces de las plantas por fijación, lixiviación u otras pérdidas. De allí que, los requerimientos de nutrientes son en general más elevados que la extracción de nutrientes por los cultivos.

La fertilización racional debe conjugar la utilización de fertilizantes orgánicos y minerales, que se complementan. Los fertilizantes orgánicos, aunque también aportan nutrientes, actúan sobre todo mejorando las propiedades fisicoquímicas de los suelos y su actividad biológica, y los minerales, en cambio, aportan la mayor parte de los nutrientes que la planta requiere (García-Serrano *et al.*, 2010).

Conforme a García-Serrano *et al.*, (2010), para determinar las necesidades de fertilizantes para los cultivos y suelos en una región determinada, se deben de considerar los aspectos siguientes:

- Análisis de suelos para determinar los nutrientes disponibles en el suelo
- Cantidad de nutrientes que requiere el cultivo
- Determinación de cada nutriente para lograr el rendimiento óptimo
- Determinación de cantidad de fertilizantes a aplicar
- Signos de carencia de nutrientes en el cultivo durante su desarrollo
- Análisis del tejido de la planta en campo
- Ensayos de validación de fertilizantes en el campo

Aplicar fertilizantes de forma adecuada y racional permite invertir en lo justo y racionalizar costos de producción además es importante tomar en cuenta la época de aplicación para optimizar el mejor aprovechamiento de los nutrientes.

De acuerdo con Alonso-Báez y Gálvez-Marroquín, (2013) el Método Sistémico Racional consiste en la aplicación o aportación de fertilizantes a un cultivo tomando en cuenta las necesidades o requerimientos de nutrientes de estos y la cantidad de nutrientes existentes en el suelo. Es así como las interacciones del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante se simplifican a tres componentes para formular una dosis de fertilización mineral: aporte del nutrimento del suelo o suministro (S), demanda del nutrimento (D) y eficiencia de la fertilización (E); Donde el aporte del suelo (S; kg ha⁻¹) se obtiene mediante un análisis químico del suelo, e indica cuánto hay de cada uno de los nutrientes. La demanda nutrimental (D; kg ha⁻¹), es la cantidad de nutrimentos que extrae el producto de interés, es decir, los kilogramos de nutrientes por kg de fruto, grano o follaje. Y la eficiencia de los fertilizantes (E), para los macronutrientes es aproximadamente: 80%, 25% y 60% para el N, P y K, respectivamente (Figura 3), estos varían de acuerdo con el manejo, fuente de fertilización, suelo y cultivo.

$$DF = \frac{D - S}{E}$$

Figura 3. Formula general de dosis de fertilización.

Donde:

DF: dosis de fertilización

D: demanda de nutriente

S: suministro

E: eficiencia de la fertilización

La eficiencia de uso de los nutrientes o fertilizantes describe como las plantas o los sistemas de producción utilizan y/o absorben los nutrientes, para evaluar esta eficiencia existen los índices agronómicos, Dobermann, (2007) describe cuatro índices agronómicos comúnmente utilizados para describir la eficiencia del uso de los nutrientes (Tabla 1).

1. Eficiencia agronómica (EA), se define como los kilogramos de incremento del rendimiento del cultivo por kilogramos de nutriente aplicado.
2. Eficiencia aparente de recuperación del fertilizante (ER), son los kilogramos de nutriente absorbido por los kilogramos de nutriente aplicado.

3. Eficiencia fisiológica (EF), definido como los kilogramos de incremento de rendimiento por los kilogramos de nutrientes absorbido.
La eficiencia de la absorción de nutrientes va a depender de la morfología y fisiología de la raíz, los elementos o nutrientes en los suelos primero deben de alcanzar la raíz en una forma adecuada o asimilable para su absorción, luego cruzar el espacio libre entre la raíz y moverse radialmente a través de la raíz hacia un tejido. En la hoja, el nutriente ingresa a la región de la pared celular (el apoplasto) y se transporta a través de la membrana plasmática hacia las células (Ciampitti, y García, 2008).
4. Productividad parcial de factor (PPF), referido a los kilogramos de rendimiento del cultivo por kilogramo de nutriente aplicado.

Tabla 1. Índices agronómicos para la eficiencia de uso de nutrientes.

Términos	Cálculos
Eficiencia Agronómica (EA)	$EA = \frac{\text{kg } \Delta \text{ rendimiento del cultivo}}{\text{kg de nutriente aplicado}}$
Eficiencia aparente de Recuperación (ER)	$ER = \frac{\text{kg de nutriente absorbido}}{\text{kg de nutriente aplicado}}$
Eficiencia Fisiológica (EF)	$EF = \frac{\text{kg } \Delta \text{ rendimiento}}{\text{kg de nutriente absorbido}}$
Productividad Parcial de Factor	$PPF = \frac{\text{kg de rendimiento del cultivo}}{\text{kg de nutriente aplicado}}$

Fuente: Dobermann, 2007.

2.5. Muestreo

El muestreo de suelos es un procedimiento para la obtención de una o más muestras representativas en un terreno y se realiza con base en los parámetros a ser evaluados. El procedimiento comienza con la ubicación de puntos de muestreo, que debe de ser lo más representativo posible de área. Después se lleva a cabo la toma de muestra (Figura 4) donde cada muestra debe ser de un kilogramo en peso seco de suelo, si se encuentra húmedo deben ser dos kilogramos. Una vez obtenida la muestra se registran los datos de lugar y fecha de muestreo (SEMARNAT, 2002).

De acuerdo con lo señalado por Laii (2005) y posteriormente por Oryschak *et al.*, (2007), para el muestreo se deben de considerar los aspectos siguientes:

- Momento o época de muestreo: en los suelos donde no se ha sembrado por un tiempo, se toman las muestras entre dos o tres meses antes de la siembra; cuando se establecen cultivos de ciclo corto se toman las muestras con dos meses de anticipación, y en cultivos permanentes, la muestra se toma cada año antes de realizar la fertilización.
- Herramientas de muestreo: se requiere de barreta, pala, bolsa de plástico, y una cubeta.
- Frecuencia de muestreo: dependerá del objetivo del análisis de suelo. Cultivos que son anuales en rotación o un solo cultivo con periodo de barbecho, se toma la muestra cada tres años. Cuando se trata de cultivos intensivos con aplicaciones regulares de fertilizantes, se toma la muestra cada dos años.
- Estrategia de muestreo: se debe hacer un plano o croquis de la superficie, donde se ubiquen los detalles o características más importantes, como las partes altas o bajas, planas o inclinadas, color de suelo, riesgo de inundaciones, áreas no fertilizadas, áreas trabajadas y fertilizadas.
- Toma de la muestra: se recorre el lote al azar en forma de zig-zag y cada 15 o 30 pasos se toma una submuestra, que se deposita en la cubeta. Después de que se tienen todas las submuestras se mezclan homogéneamente y de ahí se toma 1 kg. Esta es la muestra compuesta requerida para el análisis.
- Manejo apropiado de muestras: evitar la exposición de las muestras a la luz solar, ya que puede afectar en la determinación de nutrientes.

Para poder iniciar el proceso de la toma de muestra se debe eliminar la vegetación superficial en todos los casos, independientemente de la herramienta que se utiliza. El muestreo con pala se debe realizar una excavación en forma de “V”, de 15 a 20 cm de profundidad, evitando que se desmorone el suelo. Se saca una tajada o porción de 2- 3 cm de espesor, se corta un trozo de aproximadamente 3 cm de ancho por todo el largo de la tajada, en la parte central de la pala, eliminando los bordes laterales con una espátula o cuchillo, posteriormente se deposita en un balde para ser mezclada con otras submuestras. Las tomas de muestra de poco volumen en las que se hace el uso de taladro, barrena o calador, que son de 50 a 100 g deben de colocarse en cubetas limpias.

La profundidad de la toma de muestra dependerá del propósito; De acuerdo con el INIFAP (2012), cuando se quiere determinar las necesidades de fertilización para un cultivo anual (sorgo, maíz, frijol, trigo, etc.) se muestrea hasta una profundidad 30 cm, cuando se trata de praderas la profundidad debe ser de entre 5 y 15 cm, y para el caso de cultivos frutales y especies forestales se debe muestrear a una profundidad de 40 cm.

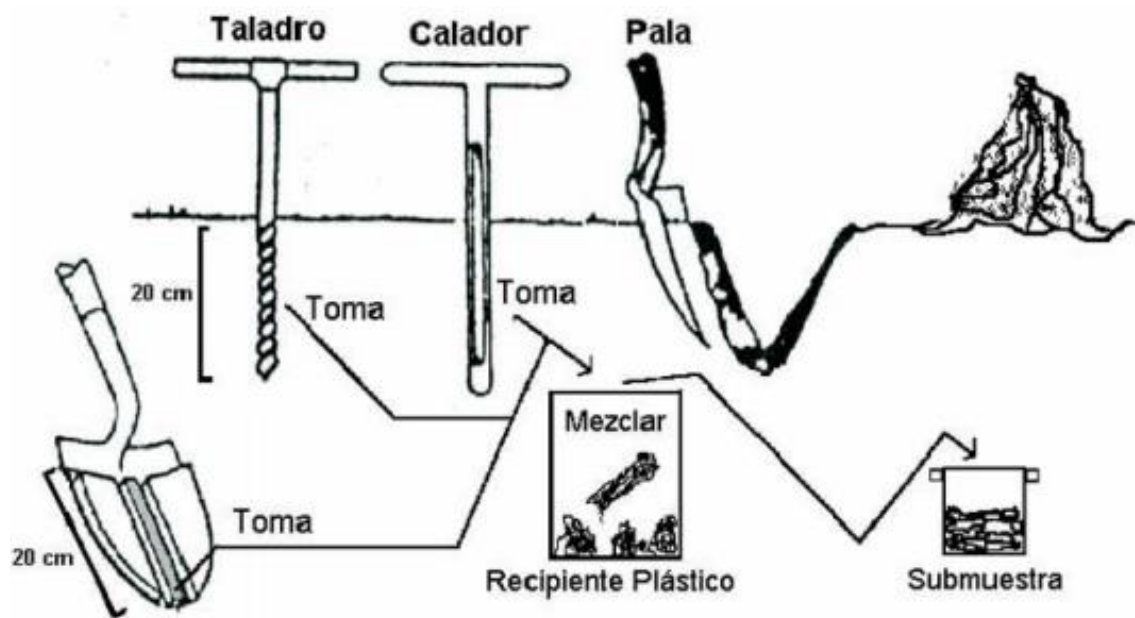


Figura 4. Procedimiento para la extracción de una muestra de suelo (En línea: www.fagro.edu.uy)

2.6. Análisis de suelo y sus variables

Los suelos tienen grandes cantidades de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, pero solo una pequeña fracción de nutrientes (normalmente menos de 1%) se encuentran en forma absorbible (Espinoza *et al.*, 2006), un análisis químico de suelo mide esta cantidad de nutrientes disponibles para los cultivos, de una pequeña muestra de suelo que es tomada en la profundidad de la capa arable.

El análisis de suelo es útil para el establecimiento de un plan de fertilización con base en los resultados, permite corregir los desbalances nutricionales que se presenten en el suelo y así ofrecer la disponibilidad de nutrientes necesarios para un desarrollo normal de las plantas. La finalidad es conocer cuanto deberá de ser adicionado en forma de fertilizante mineral para obtener un rendimiento esperado. Cuanto mayor sea el nivel de los nutrientes en el análisis de suelo, menor es la cantidad necesaria de fertilizantes (FAO, 2013).

2.6.1. Interpretación del análisis de suelo

Un análisis químico de suelo debe cumplir doble función: primero que proporcione indicadores sobre la disponibilidad de un determinado nutriente que contiene el suelo; y segundo, que funcione como base para formular una recomendación de fertilización. La fertilización se realizará de acuerdo con la clasificación elaborada con los resultados analíticos que se obtienen con métodos adecuados tanto en suelos ácidos como alcalinos (Etchevers y Padilla, 2012).

2.6.2. Materia Orgánica (MO)

La materia orgánica se expresa en porcentaje, se refiere a la cantidad de restos orgánicos que se encuentran en proceso de descomposición y que por lo tanto pueden dar lugar a aumentar el contenido en nutrientes del suelo (Tabla 2). La MO tiene una elevada CIC, lo que significa que tiene una gran capacidad para retener cationes en el suelo, de ahí su importancia, además, favorece la microestructura del suelo y la microfauna edáfica (FAO, 2013).

Los valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos minerales y volcánicos se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 2. Niveles de materia orgánica

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

2.6.3.Densidad

En materia de suelos se definen dos tipos de densidad, la aparente y la real. La densidad aparente se define como la masa (peso) de una unidad de volumen seco de suelo, es la relación entre la masa y el volumen considerando los espacios porosos de la muestra, por otro lado, la densidad real se refiere a la relación entre la masa y el volumen solamente de las partículas sólidas en el suelo, excluyendo el volumen del espacio poroso. Se expresan como una relación de gramos por centímetro cúbico (g cm^{-3}). Estos valores se utilizan para calcular el espacio poroso que hay en el suelo y por lo tanto observar si existe una mayor o menor compactación de este.

Cuando se realiza la prueba de densidad en las capas superficiales del suelo los resultado que arrojen de densidad con valores de $1.1 - 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ se consideran normal, cuando la muestra pertenece a subsuelo los valores de densidad aparente son mayores y rondan entre $1.3 - 1.7 \text{ g cm}^{-3}$ (Brandy y Weil, 2002 en Chesworth, 2008).

Tabla 3. Densidad aparente del suelo de acuerdo con la textura

Tipos de suelos	g/cm^3
Orgánicos y volcánicos	< 1.0
Minerales	
Arcillosos	1.0 – 1.19
Francosos	1.20 – 1.32
Arenosos	> 1.32

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

2.6.4. pH

El pH de suelo es una medida que permite saber el nivel de acidez o alcalinidad de un suelo, este parámetro influye en la disponibilidad de nutrientes del suelo.

En la siguiente tabla se muestra el efecto de diferentes rangos de pH de suelo sobre cultivos.

Tabla 4. Rangos de pH para suelos

pH	Clasificación¹	Efecto en el cultivo²
< 5.0	Fuertemente ácido	Posible toxicidad de Aluminio (Al) y de Manganeso (Mn). Posibles deficiencias de Fósforo (P), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Molibdeno (Mo). Es necesario encalar para la mayoría de los cultivos.
5.1 – 6.5	Moderadamente ácido	Baja solubilidad del Fósforo (P) y regular disponibilidad de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg).
6.6 – 7.3	Neutro	Condición adecuada para el crecimiento de la mayoría de los cultivos.
7.4 – 8.5	Medianamente alcalino	Buena disponibilidad de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), moderada disponibilidad de Fósforo (P) y baja disponibilidad de micronutrientes a excepción del Molibdeno (Mo).
> 8.5	Fuertemente alcalino	Baja solubilidad del Fósforo (P) y de micronutrientes a excepción del Molibdeno (Mo). Se inhibe el crecimiento de varios cultivos. Es necesario tratar el suelo con enmiendas.
> 8.5	Fuertemente alcalino	No hay crecimiento de plantas por exceso de sodio.

Fuente: SEMARNAT, 2002¹; FAO, 2013².

2.6.5. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del suelo es una medición indirecta que correlaciona varias propiedades físicas y químicas del suelo, la CE es la capacidad de un material de conducir una corriente eléctrica y se expresa en miliSiemens por metro (mS m^{-1}) (Barbosa y Overstreet, 2009).

En ciencias del suelo se emplean medidas de conductividad eléctrica para caracterizar el contenido de sal del suelo y del agua de riego; también se utiliza para medir el riesgo potencial de daño a una planta debido a las sales en el suelo. Se mide con una mezcla de 1:2 suelo agua, esta medida incluye todas las sales solubles. Las lecturas de conductividad eléctrica pueden variar drásticamente de parcela a parcela y son afectadas fuertemente por condiciones ambientales como la precipitación (Espinoza *et al.*, 2006), en la siguiente tabla se muestran valores promedio y su respectiva interpretación.

Tabla 5. Interpretación de CE

CE dS/m a 25° C	Contenido total de sal¹	Clase	Efecto
< 1.0		No salino	Efectos insignificantes de salinidad
1.1 – 2.0	< 0.15	Muy ligeramente salino	Se restringen los rendimientos en cultivos muy sensibles
2.1 – 4.0		Moderadamente salino	Rendimiento restringido en varios cultivos
4.1 – 8.0	0.15 – 0.35	Suelo salino	
8.1 – 16.0	0.35 – 0.65	Fuertemente salino	Solo los cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente
> 16.0	> 0.65	Muy fuertemente	Solo cultivos muy tolerantes rinden satisfactoriamente

Fuente: SEMARNAT, 2002 y Motsara *et al.*, 2008¹.

2.6.6. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La CIC es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en la superficie de los minerales y componentes orgánicos del suelo, representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener, mide la capacidad de un suelo para adsorber cationes de formas intercambiables, por lo tanto, la cantidad de nutrientes que puede retener, y corresponde a la carga negativa de los coloides suelo (Chesworth, 2008).

Es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente. El resultado numérico de la determinación sirve, además, como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases intercambiables, que es un dato utilizado en el estado de fertilidad del y el grado de intemperismo del suelo sus valores de interpretación se observan en la Tabla 7 de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

La CIC también se refiere a la habilidad de las partículas de suelo que tienen carga negativa para atraer y retener cargas positivas de iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^{4+} , Al^{3+} , H^+ (Espinoza *et al.*, 2006). Los suelos con mayor contenido de arcilla y MO tienen una CIC más alta que los suelos arenosos con baja MO (Havlin, 2005).

Tabla 6. Rangos típicos de CIC para diferentes texturas de suelo

Textura del suelo	CIC (cmol/kg)
Arenas (baja MO)	3 – 5
Arenas (Alta MO)	10 – 20
Franco	10-15
Franco limoso	15-25
Arcilloso y franco arcilloso	20-50
Suelos orgánicos	50-100

Fuente: FAO, 2013.

Tabla 7. Niveles de CIC y su relación con la disponibilidad de nutrientes

Fuente	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
	cmol⁽⁺⁾/kg= meq/100g_s				
SEMARNAT, 2002	< 5	5 – 15	15 – 25	25 – 40	> 40
Valero, 1994		< 10	10 – 20	> 20	

2.6.7. Bases de intercambio catiónico del suelo

Los principales iones asociados con la CIC son los cationes intercambiables calcio, magnesio, sodio y potasio, a los cuales se les denomina cationes base. La saturación de bases intercambiables representa el porcentaje de la CIC que es ocupada por bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+

y Na⁺). Estos cationes regulan los potenciales osmóticos, la permeabilidad de las membranas celulares y la conductividad eléctrica.

Tabla 8. Interpretación de resultados de bases intercambiables; Ca, Mg y K

Clase	Ca	Mg	K
		cmol⁽⁺⁾/kg	
Muy baja	< 2	< 0.5	< 0.2
Baja	2 – 5	0.5 – 1.3	0.2 – 0.3
Media	5 – 10	1.3 – 3.0	0.3 – 0.6
Alta	> 10	> 3.0	> 0.6

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

2.6.8. Elementos esenciales para el crecimiento vegetal

Todos y cada uno de los elementos nutritivos juegan un papel específico en la nutrición vegetal, por un lado, está el oxígeno, carbono, hidrogeno, nitrógeno, fosforo, potasio y azufre, que son conocidos como macronutrientes, ya que las plantas los requieren en grandes cantidades, sin embargo tres de estos elementos, N, P, K, son manejados mediante la adición de fertilizantes ya que el suelo puede no llegar a cubrir las necesidades de estos nutrientes, y por otro lado se encuentran los micronutrientes, que son elementos nutricionales que las plantas requieren en menor cantidad, son, hierro, boro, magnesio, zinc, cobre, cloro y molibdeno (Savoy, 2012).

Los elementos antes mencionados son los componentes básicos de los tejidos vegetales y que participan en reacciones bioquímicas básicas del metabolismo, los micronutrientes son catalizadores de numerosas reacciones del metabolismo de la planta (López *et al.*, 2005). En las siguientes tablas se muestran las interpretaciones de contenido de nutrientes en el suelo.

Nitrógeno (N)

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas ya que es un componente importante de la clorofila con la cual las plantas realizan la fotosíntesis y del ADN (CIMMYT, 2020).

El método para la determinación de nitrógeno extraíble con el procedimiento micro-Kjeldahl, se utiliza como índice de disponibilidad de nitrógeno en el suelo y su evaluación se realiza para generar una recomendación de fertilización.

Tabla 9. Interpretación del contenido de N

Clase	% de N
Muy bajo	0 – 10
Bajo	10 – 20
Medio	20 – 40
Alto	40 – 60
Muy alto	> 60

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Fósforo (P)

Una de las principales funciones del P en las plantas es el almacenamiento y la transferencia de energía. Los enlaces fosfato de alta energía en moléculas como el trifosfato de adenosina (ATP) y el difosfato de adenosina (ADT) impulsan prácticamente todas las reacciones bioquímicas en las plantas. El P también forma parte importante de componentes estructurales como los ácidos nucleicos, fosfolípidos y coenzimas (Oryschak, 2007).

Tabla 10. Interpretación del contenido de P

Método	Bray y Kurtz (Suelos neutros y ácidos)	Olsen <i>et al</i> (Suelos neutros y alcalinos)
Clase	mg/kg de P	
Bajo	< 15	< 5.5
Medio	15 – 30	5.5 – 11
Alto	> 30	> 11

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Boro (B)

Este elemento contribuye a mantener la integridad de la pared celularas concentraciones de B en la solución del suelo de 1mg l^{-1} pueden ser dañinas y causar lesiones foliares en las hojas más viejas, la toxicidad del boro es un problema común en las regiones áridas y semiáridas. El boro es más difícil de lixiviarse de los suelos que las sales de cloruro y sulfato porque se adsorbe fuertemente en las superficies de partículas de suelo (Sposito, 1989 en Chesworth, 2008).

Tabla 11. Interpretación de resultados de contenido de B

Rango	Boro (ppm)
Muy bajo	< 0.39
Bajo	0.39 – 0.79
Medio	0.80 – 1.29
Alto	1.30 – 2.10
Muy alto	> 2.10

Fuente:NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Hierro (Fe)

Lindsay (1991) en Chesworth (2008) menciona que el hierro está presente en los suelos en grandes cantidades, pero su solubilidad es muy baja y se pueden sufrir deficiencia de este elemento si no existiera la intervención de otros factores como los sideróforos (compuestos orgánicos que disuelve el Fe^{3+} de los minerales del suelo y forman complejos solubles de Fe^{3+} en un amplio rango de pH. De acuerdo con Horneck *et al.*, (2011), no se recomiendan las pruebas de suelo para detectar hierro ya que la mayoría de los métodos de prueba no distinguen entre formas de hierro y, por lo tanto, tienen poco significado para realizar un plan de nutrición de las plantas.

Cobre (Cu)

Es un elemento esencial para la producción de compuestos que contienen Fe. Facilita la síntesis de clorofila, funciona en el transporte de electrones fotosintéticos, e influye en varias reacciones metabólicas (Oryschak ,2007). Valores de Cu encima de 0.6 ppm som suficiente, utilizando el método de extracción DTPA.

Zinc (Zn)

El Zn juega un papel en la formación de compuestos promotores del crecimiento, transformaciones de carbohidratos, y es componente de varios sistemas enzimáticos. Las deficiencias son más probables en suelos calcáreos, de textura ligera, pH y contenido alto de P, ya que gran cantidad de P dificultan la absorción del Zn (Oryschak ,2007).

Un análisis de suelo con un contenido de Zn encima de 1.5 ppm, utilizando el método de extracción DTPA, es suficiente para la mayoría de los cultivos (Horneck *et al.*, 2011).

Manganeso (Mn)

Análisis de suelo con resultado entre 1 y 5 ppm, utilizando el método de extracción DTPA, es usualmente suficiente. La deficiencia de Mn generalmente ocurre solo cuando el pH del suelo es 8.0 o mayor a este valor (Horneck *et al.*, 2011).

Tabla 12. Interpretación de contenido de micronutrientes

Clase	Fe	Cu	Zn	Mn
	Mg/kg			
Deficiente	< 2.5	< 0.2	< 0.5	< 1.0
Marginal	2.5 – 4.5		0.5 – 1.0	
Adecuado	> 4.5	> 0.2	> 1.0	> 1.0

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Molibdeno (Mo)

El molibdeno mejora la absorción de N, K y Ca en las leguminosas, que ayudan a la fijación de N atmosférico y a la disponibilidad de Fe (Oryschak *et al.*, 2007). La adsorción del Mo es más fuerte cuando el pH del suelo es muy bajo, es la es la razón por la que la deficiencia de este elemento ocurre principalmente en suelos ácidos, y a menudo puede corregirse con encalado (Barrow, 1970 en Chesworth, 2008). La concentración de Mo en el suelo es demasiado baja para poder ser evaluada en la mayoría de los laboratorios, además de que, las deficiencias de Mo son raras. Las hortalizas con deficiencia de este elemento que son producidas en suelos ácidos muestran clorosis y deficiencia de N, la aplicación de cal generalmente aumenta el pH del suelo (Horneck *et al.*, 2011).

2.6.9. Carbonatos de calcio

Los suelos calcáreos son los que contienen suficiente carbonato de calcio como para que haga efervescencia cuando se trata con ácido clorhídrico al 10% o que contiene más de 2% de carbonato de calcio de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002.), en la Tabla 13 se muestran la interpretación de su contenido. La importancia de medir los niveles de carbonatos en el suelo reside en que un porcentaje elevado de estos puede influir negativamente en aspectos como el desarrollo radicular, la absorción de fósforo, hierro, zinc o cobre.

Tabla 13. Interpretación de resultados para el contenido de CaCO₃. Por el método de neutralización ácida

Clase	% CaCO ₃
Muy bajo	< 0.5
Bajo	0.5 – 2.0
Mediano	2.1 – 15
Alto	16 – 40
Muy alto	> 40

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

2.6.10. Aluminio (Al)

El aluminio es un elemento tóxico para la mayoría de las plantas, suelos con condiciones de acidez favorecen la concentración de iones de Al. En condiciones de pH bajo se reduce la saturación de las bases intercambiables del suelo porque se desplazan Ca²⁺ y K⁺, de los sitios de intercambio con H⁺ con iones de aluminio Al³⁺ los cuales son solubles. Los nutrientes desplazados en los sitios de intercambio pueden perderse o lixiviarse en el suelo causando una baja disponibilidad, de ahí la importancia de conocer el contenido de Al en el suelo, cabe resaltar que la solubilidad del Al incrementa en condiciones fuertemente ácidas, en estas condiciones lo más recomendable es ajustar el pH del suelo (Oryschak *et al.*, 2007).

Tabla 14. Niveles críticos de Al⁺

Nivel de disponibilidad	Al⁺ (%)
Bajo	< 0.4
Medio	0.4 – 0.9
Alto	> 0.9

Fuente: FAO, 2013.

2.7. Buenas prácticas de fertilización “4R”

Los fertilizantes juegan un papel importante en el aseguramiento de la producción de cultivos alimentarios en todo el mundo. Se estima que los fertilizantes soportan de un 40-60% la producción agrícola actual. Con el fin de cumplir los objetivos de seguridad alimentaria para el presente y el futuro establecido por la ONU (Organización de las Naciones Unidas) se establecieron las pautas de administración de nutrientes para un uso responsable de los fertilizantes mediante las “4R”, que fueron desarrolladas por la industria de fertilizantes como un proceso para guiar las mejores prácticas de gestión de estos en todas las regiones del mundo (Johnston y Bruulsema, 2014).

El concepto de las 4R para la administración de nutrientes, por su significado en inglés, se describe a continuación.

2.7.1. Dosis correcta (Right rate)

Se refiere a asegurar la aplicación de una cantidad adecuada de todos los nutrientes limitantes para cumplir con la demanda de la planta y con los objetivos de rendimiento y calidad (IFA, 2009; Drechsel *et al.*, 2015).

La aplicación insuficiente o excesiva de nutrientes presenta un gran desafío para la producción agrícola en la mayoría de los países en desarrollo, incluyendo México, de ahí su importancia para asegurar una cantidad de fertilizantes adecuada, si bien la aplicación excesiva puede parecer un escenario poco realista para la mayoría de los agricultores, en

realidad es muy común este tipo de prácticas, en áreas donde no hay métodos analíticos o recomendaciones inapropiadas (Johnston y Bruulsema, 2014).

Comprender las necesidades de nutrientes de un cultivo través de sus diferentes etapas de crecimiento es un primer paso para poder proporcionar la dosis correcta de aplicación de fertilización para equilibrar el suministro de nutrientes con la demanda de cultivos durante las etapas de crecimiento para evitar la deficiencia o exceso de nutrientes. El rendimiento y la calidad de los cultivos se ven restringidos cuando la dosis de fertilización es demasiado baja, mientras que el exceso de aplicación puede provocar daños en los cultivos e impacto negativo en el ambiental (Heffer *et al.*, 2015).

2.7.2.Momento correcto (Right time)

Es el momento o tiempo de aplicación de nutrientes considerando las interacciones de absorción de cultivos, suministro de suelo, riesgos ambientales, etapa de crecimiento y logística de operaciones de campo (Heffer *et al.*, 2015).

El momento óptimo de aplicación de nutrientes a los cultivos asegura su suministro adecuado durante la absorción máxima y las etapas críticas de crecimiento. Se ha demostrado, por ejemplo, que dividir la aplicación de N del cultivo mejora la eficiente de este elemento en el cultivo (IFA, 2009).

Si el nutriente está presente en el suelo por un tiempo prolongado antes de la absorción del cultivo, puede salirse de la zona de enraizamiento o convertirse en formas no disponibles (Heffer *et al.*, 2015).

La eficiencia del uso de nutrientes se puede aumentar significativamente cuando su disponibilidad se sincroniza con la demanda de los cultivos. Algunos ejemplos de como los fertilizantes se pueden sincronizar para una absorción eficiente en los cultivos son, aplicaciones divididas, uso de fertilizantes de lenta y controlada liberación, estabilizadores y niveladores (IFA, 2009).

2.7.3.Lugar correcto (Right Place)

Se debe colocar los nutrientes en el lugar correcto para aprovechar la dinámica de raíz-suelo tomando las consideraciones de movimiento de nutrientes, variabilidad espacial dentro del campo del cultivo y el potencial para minimizar las pérdidas de nutrientes del campo (IFA, 2009).

Tener nutrientes en el lugar correcto, vertical y horizontalmente, asegura que las raíces de las plantas puedan absorber suficiente cantidad de cada nutriente en todo momento, implica hacer todo lo posible para mantenerlos nutrientes donde las plantas puedan usarlo (Johnston y Bruulsema, 2014).

Existen diferentes métodos de aplicación de fertilizantes, dependiendo del tipo de fertilizante que se emplee, el sistema de producción y el equipo que se utilice para producir un cultivo.

Fertilización al voleo

El esparcimiento a voleo del fertilizante (es decir aplicándolo a la superficie de un campo) es usado principalmente en cultivos densos no sembrados en filas y en prados o cultivos de cobertera. Es también usado cuando los fertilizantes deben de ser incorporados en el suelo como es el caso de los fertilizantes fosfatados y para evitar las pérdidas por evaporación de nitrógeno (urea, fosfato di amónico). Es un método de aplicación generalmente utilizado para grandes áreas de campo, cuando el tiempo o la mano de obra son limitados o cuando es importante obtener una distribución uniforme de la enmienda del suelo, como la aplicación material de encalado (FAO, 2002).

Fertilización localizada en bandas o hileras

Cuando la aplicación del fertilizante es localizada, el fertilizante es concentrado en partes específicas del suelo durante la siembra, puede ser en bandas o en una franja debajo de la superficie del suelo, al lado o debajo de la semilla. Este proceso puede ser realizado a mano, con equipo especial de siembra o de aplicación de fertilizantes. Es preferible usarlo para cultivos en hileras, que tienen relativamente grandes espacios entre las filas (maíz, algodón

y caña de azúcar); en suelos con una tendencia a la fijación de fosfato y potasio, en suelos con un bajo nivel de fertilidad, y en lugares en los cuales los cultivos son trabajados a mano y plantados en colinas. Se debe tener mucho cuidado en que ningún fertilizante sea ubicado demasiado cerca de la semilla o plántula, para evitar daño por sal en la siembra (quemadura de raíces) (FAO, 2002).

Fertilización en cobertura

La fertilización en cobertura (esparciendo el fertilizante a voleo sobre un cultivo en pie) es usado principalmente en cultivos de granos pequeños y grandes, específicamente en cultivos forrajeros. La aplicación en cobertura es una práctica normal en suelos en los cuales hay necesidad de nitrógeno adicional, y en cultivos donde existe una pérdida potencial de nutrientes, por ejemplo, cuando se aplica la cantidad total de nitrógeno que es requerido al momento de la siembra, podría llevar a pérdidas a través de la lixiviación; Por otro lado, este método es también empleado en cultivos que muestran una necesidad especial de nitrógeno en ciertas etapas de desarrollo. El nitrato móvil se mueve hacia abajo en el suelo y puede ser tomado por las raíces de las plantas. La fertilización de cobertura de potasio, que no se mueve en el suelo al mismo grado del nitrógeno, podría ser recomendado en suelos ligeros, es decir aplicando la cantidad total dividida entre un abono de fondo y uno de cobertura. El fosfato difícilmente se mueve en el suelo, de aquí que sea aplicado usualmente antes o en el momento de la siembra o de la plantación (aplicación de fondo), preferiblemente combinado con potasio y parte del nitrógeno (FAO, 2002).

Fertilización entre líneas

Aplicar el fertilizante entre líneas es la práctica de ponerlo al lado de las plantas que están espaciadas ampliamente, en hileras tales como maíz, algodón y caña de azúcar. Los árboles y otros cultivos perennes son también abonados de esta manera (FAO, 2002).

Acolchado o revestimiento lateral

Sayoy, (2012), menciona que este término generalmente se refiere a los materiales fertilizantes aplicados al suelo (después de que el cultivo ha terminado) durante el periodo de crecimiento temprano a medio de un cultivo. Los materiales fertilizantes pueden colocarse en ambos lados de la hilera a una distancia de 15 a 20 centímetros de la planta o en bandas en medio de la hilera. Los fertilizantes nitrogenados son los que se emplean con mayor frecuencia a comparación de los que contienen fósforo o potasio. Es usualmente empleado para complementar las necesidades de nitrógeno, también para favorecer el uso eficiente de nutrientes en cultivos con condiciones que favorecen la pérdida de nitrógeno (en suelos arenosos, suelos húmedos y suelos de regadío).

Fertilización foliar

La aplicación foliar es el método más eficiente de suministro de micronutrientes (pero también de N o N-P-K en una situación crítica para el cultivo) que son necesarios solamente en pequeñas cantidades y pueden llegar a ser indisponibles si son aplicados en el suelo. Para minimizar el riesgo de quemado de las hojas, la concentración recomendada tiene que ser respetada y aplicada preferiblemente en días nublados y en las primeras horas de la mañana o en las últimas del atardecer para evitar que las gotitas se sequen inmediatamente (FAO, 2002).

Los nutrientes que son aplicados vía foliar son absorbidos y utilizados por la planta con mucha rapidez. La absorción comienza unos minutos después de la aplicación y se completa en uno o dos días con la mayoría de los nutrientes. La nutrición foliar puede complementar la nutrición del suelo en un momento crítico para la planta, pero no es un sustituto de la aplicación, esto es especialmente cierto para los nutrientes primarios y secundarios (Savoy, 2012).

Fertiirrigación

Savoy, (2012), menciona que el fertirriego es aportar fertilizantes en una solución para regar plantas, elementos como el nitrógeno y el potasio, al igual que otros elementos, a veces se cubren mediante este método, y que el fosforo no recomendable aplicar de esta manera porque forma muchos compuestos insolubles con otros elementos presentes en el agua de riego, esto tiende a obstruir el sistema de riego, a menos que se tome especial cuidado para mantener el pH del agua en un nivel donde la mayoría de estos compuestos permanezcan en solución. Por lo general, es mejor atender las necesidades de fósforo (si existe, muchos suelos contienen niveles de fosforo adecuados para la producción de cultivos) mediante la aplicación al voleo de fertilizantes concentrado de superfosfato, antes del establecimiento del cultivo.

2.7.4.Fuente correcta (Right source)

Elegir formas de nutrientes disponibles para las plantas, que proporcionen un suministro equilibrado de todos los nutrientes esenciales, con una liberación adaptada a la demanda del cultivo (Heffer *et al.*, 2015).

La fuente correcta implica la adaptación del fertilizante a la necesidad del cultivo y propiedades del suelo, no es un concepto simple cuando se consideran las variaciones en los objetivos de rendimiento, el manejo previo del cultivo, el manejo de residuos de cultivos, la influencia de los cultivos de leguminosas de rotación, etc. (Johnston y Bruulsema, 2014).

La selección de la fuente correcta debe considerar el riesgo a la acidez, alcalinidad, sodicidad y salinidad, y otros aspectos como la susceptibilidad a la pérdida de nutrientes, la interacción de los nutrientes o problemas de compatibilidad, la sensibilidad potencial de los cultivos a la fuente y el riesgo de cualquier elemento no nutritivo incluido con el material fuente o fertilizante (Heffer *et al.*, 2015).

De acuerdo con la FAO (2013) un fertilizante mineral es aquel producto industrializado que contiene al menos un 5% de uno o más nutrientes que la planta necesita para su ciclo de vida. La característica más importante de cualquier fertilizante es la solubilidad máxima que debe

tener en el agua, para que pueda disolverse, ya que los nutrientes sean tomados por la planta de forma activa o pasiva por medio del flujo del agua. Estos elementos o nutrientes se pueden clasificar en:

- Macroelementos: se expresan en % o g/100g, los principales son N, P, K, Ca, Mg, S.
- Microelementos: se expresan en ppm=mg/Kg=mg/1000g y son: Fe, Zn, Cu, B, Mn, Mo, Cl.

En las etiquetas de los fertilizantes se indican la cantidad de los nutrientes o elementos primarios (N, P, K), así como otros nutrientes que contienen. La información esta expresada en porcentaje (%) de cada elemento que se encuentra en forma de concentración de una sal y no es su forma pura.

El N siempre está reflejado como cantidad total de N elemental, pero la cantidad de P normalmente se expresa en porcentaje de pentóxido de fosforo (P_2O_5) y el K como óxido de potasio (K_2O).

Al hacer uso de fertilizantes minerales se deben considerar las características químicas del suelo y el comportamiento de los fertilizantes al incorporarse, como es el caso de la compatibilidad, ya que pueden reaccionar entre ellos y formar compuestos insolubles precipitados, otro aspecto a considerar es el carácter ácido o alcalino, ya que esta reacción tendrá influencia en la solubilización o insolubilización de los precipitados, así como un cambio en el pH del suelo. Si los fertilizantes empleados incrementan el pH se tiene riesgo de generar precipitados, si lo baja disminuirá el riesgo de precipitados. Algunos fertilizantes al inicio presentan un pH alcalino en el agua, pero al incorporarse al suelo tienen una reacción acidificante (Guzmán y López, 2004).

Los fertilizantes tienen diferente conductividad eléctrica y esta se utiliza para conocer la salinidad que genera y poder elegir el producto más adecuado, el conocer este parámetro del fertilizante permite elegir aquellos que tienen una baja o alta conductividad eléctrica para buscar un determinado beneficio; es importante conocer los índices de salinidad y acidez porque los fertilizantes ejercen gran influencia sobre el pH del suelo y por lo tanto, afecta en el desarrollo de las plantas (Guzmán y López, 2004).

En la Tabla 15 se muestran algunas características de los fertilizantes más empleados, el contenido de N-P₂O₅-K₂O, velocidad de reacción y su efecto en el pH del suelo.

Tabla 15. Características de algunos fertilizantes

Material		N-P ₂ O ₅ - K ₂ O	Velocidad de reacción	Efecto en el pH	índice de salinidad (NaNO ₃ =100)	de índice de acidez (CaCO ₃ /100kg)
Sulfato amonio	de	20-00-00	Rápido	Muy acido	68.3	110
Nitrato amonio	de	34-00-00	Rápido	Acido	104.7	52
Urea		45-00-00	Rápido	Ligeramente acido	74.4	84
Fosfato monoamónico (MAP)		11-48-00	Rápido	Acido	26.7	65
Fosfato amónico (DAP)	di	18-46-00	Rápido	Acido	34.2	64
Superfosfato triple		00-46-00	Medio	Neutro	10.0	0
Superfosfato		00-20-00	Medio	Neutro		
Cloruro potasio	de	00-00-60	Rápido	Neutro	120.1	0
Sulfato potasio	de	00-00-50	Rápido	Neutro	46.0	0
KH ₂ PO ₄		00-52-34	Rápido	-	8	-

Fuente: Crouse y Denny, 2015; Mortvedt, 2001; McCauley *et al.* 2003 en Oryschak, 2007; Salinas-Ramirez *et al.*, 2008.

La administración de nutrientes aplicando las 4R requieren la implementación de las buenas prácticas agrícolas (BPA) que optimicen la eficiencia y la efectividad del uso de fertilizantes. El objetivo de las BPA de fertilizantes es hacer coincidir el suministro de nutrientes con los requisitos del cultivo para optimizar el rendimiento y minimizar las pérdidas de nutrientes de

los campos. Las BPA varían según la ubicación, y las que mejor funcionan en una determinada región, condición climática, condición del suelo, el tipo de cultivo, sistema de manejo y factores específicos del lugar (IFA, 2009).

3. Cultivo de ejote

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es cultivado principalmente para consumirse como grano seco y en menor cantidad es utilizado para alimentación como semillas frescas y vainas tiernas, estas últimas conocidas en México como ejotes (Diaz *et al.*, 2010).

La palabra ejote proveniente del vocablo náhuatl “exotl” significa frijol verde, los ejotes son los frutos inmaduros de la planta de frijol y son aprovechados como verdura. El ejote, también es conocido como judía verde o habichuela en otros países. Esta leguminosa es rica en agua, contiene vitaminas A y C, ácido fólico, fibra soluble, minerales como sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro (SADER, 2019).

Actualmente se importa de Estados Unidos la semilla de frijol ejotero para ser sembrado en México, una de las consecuencias de esto es que las variedades se desarrollan en otros ambientes y se tiene el riesgo de no adaptarse a las condiciones de cultivo de México (Esquivel *et al.*, 2006).

3.1. Importancia del cultivo

En México la superficie promedio total sembrada con ejote en los últimos 10 años (2009-2019) fue de 9,730 ha, de las cuales 226 ha son de temporal y 9,504 ha de riego. El rendimiento promedio nacional para temporal es de 7.33 ha⁻¹ y 9.25 ha⁻¹ para riego (SIAP, 2019).

3.1.1. Importancia mundial

De acuerdo con la FAOSTAT, para el año 2018, hubo una producción mundial de 44,600,000 t de ejote. México se encuentra dentro de los 15 principales productores de esta hortaliza, con una producción de 91,800 t (ver fig. 5).

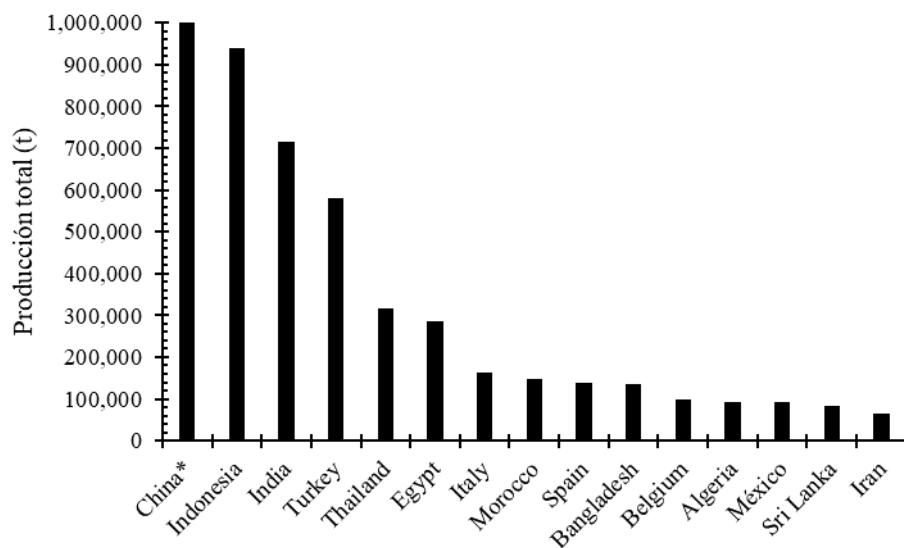


Figura 5. Principales productores mundiales de ejote (FAOSTAT, 2019).
*La producción total de China es de 19,910,000 t.

De los principales países productores, China y Marruecos obtienen los mayores rendimientos con 29 t ha^{-1} y 25 t ha^{-1} respectivamente, muy superior al resto de los demás países, México tiene un rendimiento promedio de 10 t ha^{-1} , lo cual es superior al promedio mundial de 8.4 t ha^{-1} , Figura 6 (FAOSTAT, 2019).

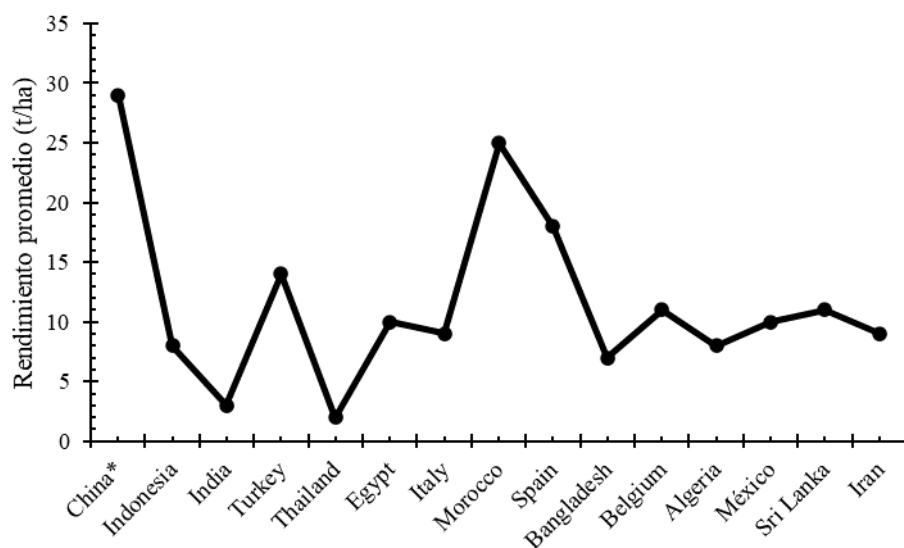


Figura 6. Rendimiento promedio de los principales productores mundiales de ejote (FAOSTAT, 2019)

3.1.2.Importancia nacional

El ejote es sembrado en 19 Estados de la República mexicana, en 2018 generaron una producción aproximada de 91,852 toneladas, según datos del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). Los estados con mayor superficie cultivada con ejote en ese mismo año fueron, Morelos con un 28%, Hidalgo con un 20%, Puebla con un 15% y Sinaloa con un 14%, de un total de 9,401 hectáreas, el área en hectáreas es mostrado en la Figura 7 (SIAP, 2019).

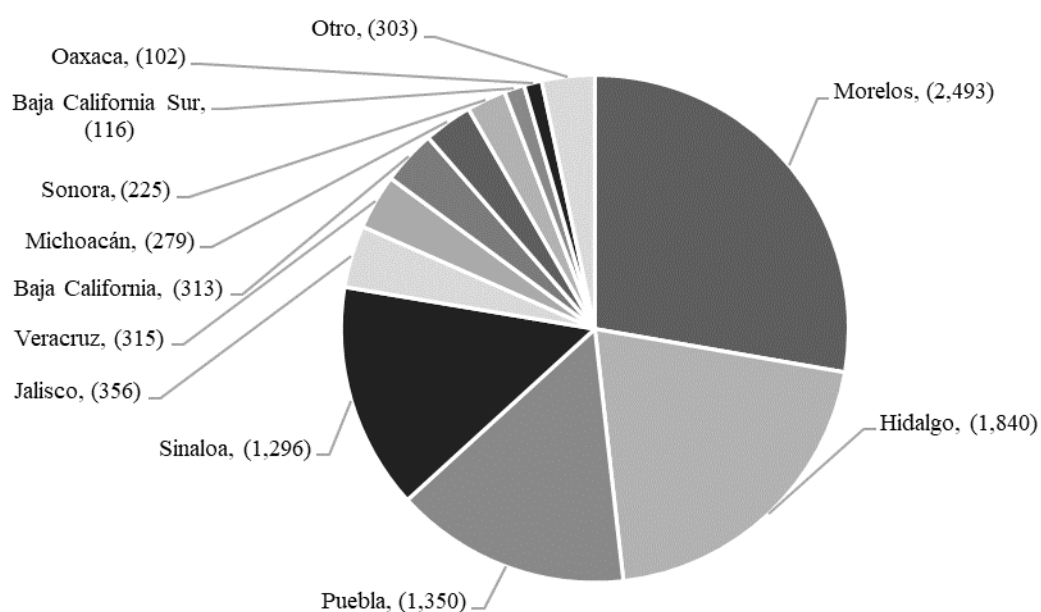


Figura 7. Distribución de la superficie cultivada con ejote en México en hectáreas (SIAP, 2018).

Por otro lado, los estados que destinan la producción para exportación son Sinaloa, con una superficie sembrada de 658 hectáreas y un rendimiento promedio de 14.2 t ha^{-1} ; Baja California Sur, con 35 ha, un rendimiento de 10.2 t ha^{-1} , y Sonora con 89 ha con rendimiento de 12.2 t ha^{-1} . En promedio estos estados que destinan su producción a exportación logran los rendimientos más altos del país con un promedio de 13.91 t ha^{-1} de ejote. El ejote de exportación está dirigido principalmente a Estado Unidos para su consumo en fresco, enlatado o congelado. En el estado de México se logra un rendimiento promedio de 9.5 t ha^{-1} . (SIAP, 2018).

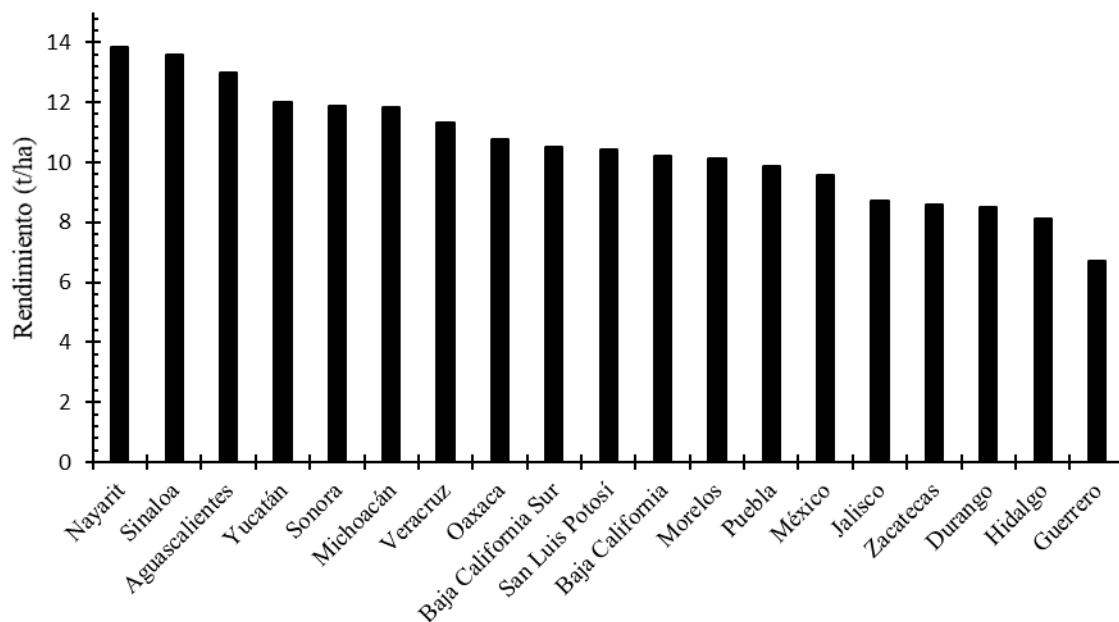


Figura 8. Rendimiento promedio por estado productor de ejote (SIAP, 2018).

3.1.3. Frijol ejotero en el Estado de México.

De acuerdo con datos del SIAP (2018), en los últimos diez años, en el Estado de México los municipios que reportan mayor superficie de siembra y cosecha son los siguientes, en orden descendiente; Malinalco, Tonicoco, Texcoco, Villa de Guerrero, Valle de Bravo, Zumpahuacán y Coatepec de harinas.

La producción de frijol ejotero en el Estado de México se mantuvo constante de 2009 a 2015, después de este último año aumento a más del doble la superficie cultivada, el año con menor área cultivada fue el 2018, este fenómeno puede ser un indicador de que la superficie de este cultivo disminuya o se mantenga similar en los próximos años (Figura 9).

En el año 2019, la superficie sembrada con ejote es menos del 1% con respecto a la superficie del estado, con un total de 4.1 hectáreas sembradas, de esa superficie 2.5 ha corresponde al municipio de Malinalco y 1.6 hectáreas al municipio de Tonicoco (SIAP, 2019).

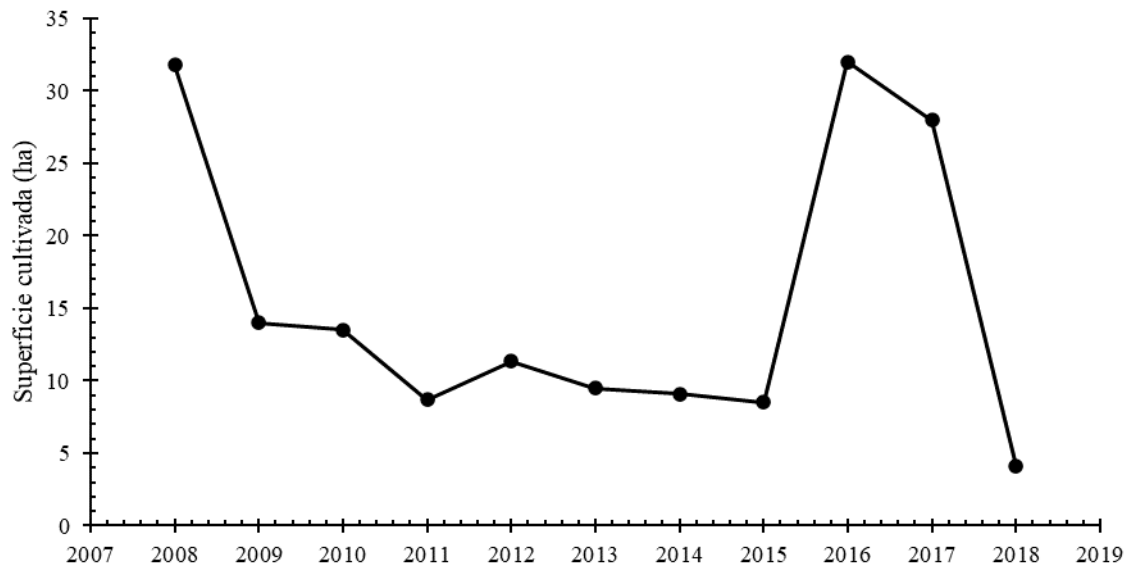


Figura 9. Superficie cultivada con frijol ejotero del periodo de 2008 a 2018) en el Estado de México (SIAP, 2018).

En la siguiente grafica (Figura 10) se observa el rendimiento del cultivo de ejote de 2008 a 2018, el rendimiento ha sido constante y en aumento, ya que paso de 5 t ha⁻¹ en 2008 a 10 t ha⁻¹ en 2018, el aumento en el rendimiento se le podría atribuir al uso de variedades diferentes que se adapten a la zona o la mejora de las prácticas agrícolas.

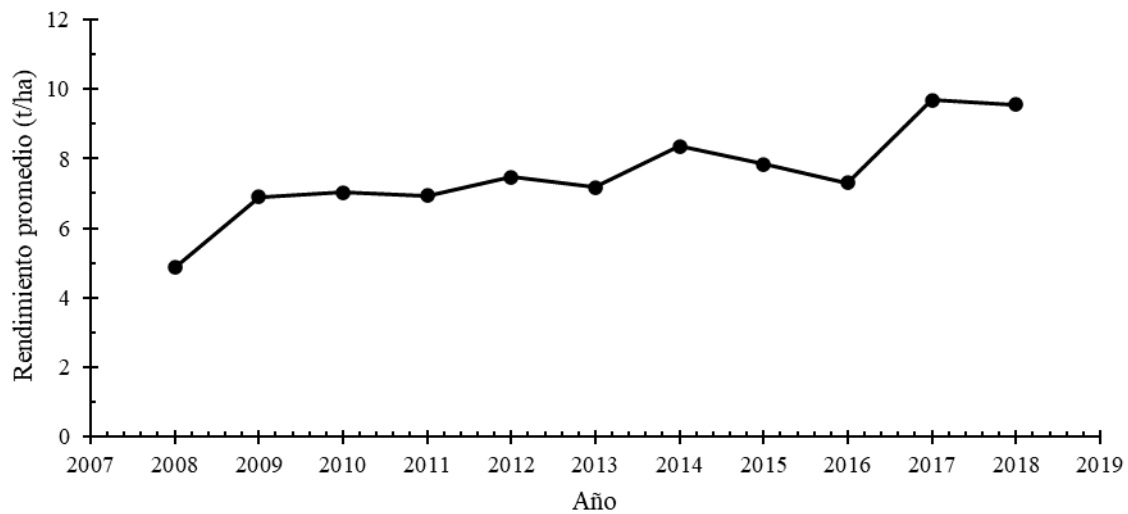


Figura 10. Rendimiento promedio de frijol ejotero en el Estado de México del período de 2008 a 2018 (SIAP, 2018).

3.2. Descripción botánica

El frijol pertenece a la familia *Leguminosae*, es una especie anual, herbácea, dicotiledónea, con hojas trifoliadas, con sistema radicular fasciculado, fibroso. El tallo es el eje principal de la planta, está formado por una sucesión de nudos y entrenudos, con sección cilíndrica; puede ser erecto, semi postrado o postrado, según el hábito de crecimiento de la variedad.

Se cultivan dos tipos de esta especie: el tipo arbustivo y el trepador. En los tipos arbustivos, las inflorescencias se desarrollan casi simultáneamente, mientras que en los trepadores las flores aparecen una después de otra por un largo periodo de tiempo. Las flores pueden ser blancas, amarillentas o rosa-purpura. Las vainas miden 13 cm o más de largo y pueden ser planas o redondeadas. Las semillas maduras pueden ser blancas, negras o de una amplia gama de colores (Atilio y Reyes, 2008).

Por ser una planta leguminosa efectúa un mecanismo de simbiosis, con la bacteria *Rhizobium*, la cual provee nitrógeno, presenta nódulos distribuidos en las raíces laterales de la parte superior y media del sistema radical, fijan el nitrógeno atmosférico, que contribuye a satisfacer los requerimientos de este elemento en la planta (Atilio y Reyes, 2008).

3.2.1. Tallo

Dependiendo de la variedad y el hábito de crecimiento los tallos son herbáceos, delgados, de diferente longitud, tamaño, número de nudos, diámetro y longitud de entrenudos. En cada nudo se encuentran insertadas hojas, ramas, vainas y racimos florales. De acuerdo con la parte terminal del tallo, las variedades son de crecimiento determinado o indeterminado. Cuando es determinado, el tallo finaliza en una inflorescencia que le detiene el crecimiento; es indeterminado, si en su extremo posee un meristemo vegetativo que posibilita el continuar creciendo y el tallo puede tener de 20 a 30 nudos, puede alcanzar más de dos metros de altura con un soporte adecuado y la etapa de floración es significativamente más larga que la de otros hábitos, de tal manera que en la planta se presentan un mismo tiempo las etapas de floración, formación de las vainas, llenado de vainas y maduración (Virgilio, 2003).

3.2.2.Hojas

Las hojas son compuestas, trifoliadas, dotadas de pequeñas estipulas en la base del peciolo. Los foliolos son ovalados o triangulados y de diferente color y pilosidad según la variedad, posición en el tallo y edad de la planta (Virgilio, 2003).

3.2.3.Flor

La inflorescencia puede ser axilar o terminal, dependiendo de su inserción en el tallo; es un conjunto de racimos, es decir, un racimo principal con un grupo de racimos secundarios. La flor es típica papilionácea de fecundación autógena; en su desarrollo tiene dos etapas, botón floral y flor completamente abierta. Según la variedad pueden ser de color blanco, rosado o púrpura (Virgilio, 2003).

3.2.4.Fruto

El fruto es una vaina variable en color, forma, ancho y largo; formado por dos valvas unidas por fibras; la textura de la vaina puede ser pergaminosa con fibras fuertes, coriácea cuando existe leve separación de las valvas y, carnosa sin fibras en la unión de las valvas. A la unión de estas, se les llama suturas: placental y ventral (Virgilio, 2003).

3.2.5.Semilla

Semilla de forma cilíndrica, arriñonada, esférica; provistas de dos cotiledones gruesos; color variado: rojo, blanco, negro, café, crema y otros; también existe la combinación de colores. Dependiendo de la variedad, un kilogramo tiene entre 2,500 y 4,500 semillas (Virgilio, 2003).

3.2.6.Habito de crecimiento

Rosas (2003), menciona que los principales caracteres morfológicos y agronómicos que ayudan a definir el hábito de crecimiento del frijol son:

1. El desarrollo de la parte terminal del tallo, el cual permite calificarlo como determinado o indeterminado.
2. El número de nudos.
3. La longitud de los entrenudos, la altura de la planta.
4. La aptitud para trepar.
5. El grado y el tipo de ramificación. Es necesario incluir el concepto de guía, el cual es definido como la parte del tallo y ramas que sobresalen por encima del follaje del cultivo

La misma autora los describe de la manera siguiente:

Tabla 16. Hábitos de crecimiento del frijol.

Habito de crecimiento determinado	
Tipo I	<p>Habito de crecimiento determinado arbustivo. El tallo y las ramas terminan en una inflorescencia desarrollada. Cuando esta inflorescencia está formada, el crecimiento del tallo y las ramas generalmente se detiene.</p> <p>El tallo principal es vigoroso y presenta 5 a 10 entrenudos comúnmente cortos. La altura de las plantas varía normalmente entre 30 y 50 cm, existiendo casos de plantas enanas (15 a 25 cm). La etapa de floración es rápida y la madurez de las vainas ocurre en forma bastante concentrada.</p>
Habito de crecimiento indeterminado	
Tipo II A	Habito de crecimiento indeterminado arbustivo: tallo erecto sin aptitud para trepar, aunque termina en una guía corta. Las ramas no producen guías.
Tipo II B	Habito de crecimiento indeterminado arbustivo: tallo erecto, con aptitud para trepar, termina en una guía larga.
Tipo III	<p>Habito de crecimiento indeterminado postrado: plantas postradas o semi postradas con ramificación bien desarrollada.</p> <p>La altura de las plantas es superior a la de las plantas de tipo I Y II (generalmente mayor a 80 cm). Así mismo, la longitud de los entrenudos es superior respecto a los hábitos anteriormente descritos y tanto el tallo como las ramas terminan en guías. Algunas plantas son postradas desde las primeras fases de la etapa vegetativa. Otras son arbustivas hasta prefloración y luego son postradas. Dentro de estas variaciones se puede presentar aptitud trepadora especialmente si las plantas cuentan con algún soporte en cuyo caso suelen llamarse semitrepadoras</p>

Tipo IV	Habito de crecimiento indeterminado trepador. El tallo principal puede tener de 20 a 30 nudos, alcanza hasta 2 o más metros de altura si es guiado, ya sea a través de tutores o de plantas de cultivo que le sirvan como soporte. La floración se prolonga durante varias semanas, pudiendo presentarse vainas casi secas en la parte basal de la planta, mientras en la parte alta continúa la floración. Las ramas, que son muy poco desarrolladas a consecuencia de la fuerte dominancia apical.
---------	--

Fuente: Rosas, 2003.

3.2.7.Fenología del cultivo

Durante el ciclo del cultivo, se desarrollan dos fases: vegetativa y reproductiva. La vegetativa se da desde la siembra de la semilla hasta el surgimiento de la floración; se caracteriza por el rápido aumento de la materia seca, pues la planta invierte su energía en la síntesis de nuevos tejidos de absorción y en la fotosíntesis. La reproducción inicia con la finalización de la vegetativa y termina cuando los frutos están listos para la cosecha; en esta fase los frutos extraen de la planta los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración. En las variedades de crecimiento indeterminado el desarrollo vegetativo no se detiene, por lo que hay producción simultanea de tallos, ramas, hojas, flores y frutos (Atilio y Reyes, 2008).

Cada fase está formada por un conjunto de etapas (identificadas con una letra seguida de un número) cuya duración depende del hábito de crecimiento y la precocidad de las variedades.

Las etapas de la fase vegetativa y su duración son: germinación (V0), cinco días; emergencia (V1), dos días; hojas primarias (V2), dos a cuatro días; primera hoja trifoliada (V3), cinco a nueve días; tercera hoja trifoliada (V4), siete a quince días. Las etapas de la fase reproductiva y su duración son: prefloración (R5), nueve a once días; floración (R6), cuatro a seis días; formación de vainas (R7), ocho a nueve días (Virgilio, 2003).

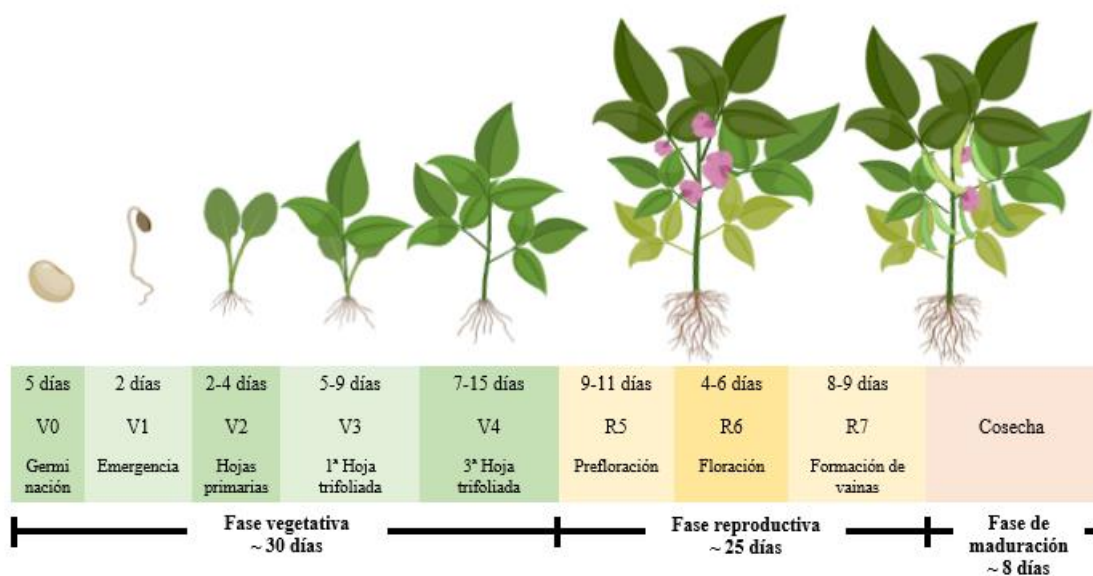


Figura 11. Fenología del frijol ejotero (Virgilio, 2003).

3.2.8. Variedades de frijol ejotero más utilizadas

Variedades de crecimiento determinado: Derby, Probe , Storm, Strike, Contender, Quantum y Jade; florecen entre 30 y 35 días después de la siembra (DDS) y están listas para la cosecha a partir de 42 DDS, alcanzando rendimientos de seis toneladas por hectárea (Virgilio, 2003).

Variedades de crecimiento indeterminado: Negro Polo, Malibú y Blue Lake; inician la floración alrededor de los 40 días y la cosecha a los 50 días después de la siembra; obteniendo rendimientos de hasta nueve toneladas por hectárea con un promedio de 10 cortes (Virgilio, 2003).

3.3. Manejo agronómico del ejote

3.3.1. Requerimientos edafoclimáticos

El frijol es una planta que crece y se desarrolla de mejor manera en suelos arcillosos o arenarcillosos, sin embargo, puede cultivarse fácilmente en muchos tipos de suelo. Los suelos que son muy ricos en materia orgánica promueven el crecimiento vegetativo sobre la

producción de vainas. Este cultivo se desarrolla en suelos con buena aireación y drenaje ya que no tolera suelos compactados, así como la poca aireación y acumulación de agua. Las plantas jóvenes son más tolerantes a las bajas temperaturas que las plantas durante la floración y la formación de vainas (Koutsika y Traka, 2008).

El cultivo requiere temperaturas mínimas de 10°C y máxima de 28°C, siendo el rango óptimo de 20°C a 25°C. Su ciclo vegetativo se alarga conforme se reduce la temperatura, y las temperaturas altas aceleran los procesos fisiológicos. Temperaturas extremas provocan el vaneo del frijol, vainas vacías, al afectar la viabilidad del polen, aborto de flores y vainas y reducción del tamaño de la semilla (Koutsika y Traka, 2008). La humedad relativa que requiere es de entre el 70% y el 80%, precipitaciones entre 300 a 400 mm de lluvia (González, 2002).

El frijol requiere de humedad adecuada en el suelo para que haya buen crecimiento, desarrollo, formación y llenado del grano. Las plantas de frijol consumen la mayor cantidad de agua en las etapas de floración y durante el llenado de vainas, en estas etapas son sensibles al déficit de agua, afectando seriamente los rendimientos además de que el exceso de humedad hace escasear el nitrógeno disminuyendo su desarrollo (Salinas- Ramírez *et al.*, 2010).

Las características químicas óptimas que requiere el cultivo son: pH de 5.5 a 7.0, conductividad eléctrica menor de 3.0 dS m⁻¹ (Aguirre, 1993 y González, 2002). El rango de CE de una suspensión suelo: agua 1:1 para los cuales ocurren reducciones de rendimientos en el frijol y por lo tanto en el ejote es cuando la CE > 0.90 dS m⁻¹, se puede observar en la Tabla 17 (USDA, 1999).

Tabla 17. Tolerancia del frijol a la salinidad, y su relación con porcentajes de disminución de rendimientos.

Cultivo	% de disminución de rendimiento		
	10	25	50
Frijol	1.0	2.0	3.0

Fuente: Garavito, 1979; modificado por Flores, 1989 en Aguirre-Hernández, 2009.

3.3.2.Preparación del terreno

Es indispensable que la planta pueda desarrollar y profundizar muy bien sus raíces y tenga un buen anclaje al suelo, para que de esta manera obtenga los nutrientes necesarios para su desarrollo con facilidad, esto se puede lograr dando una pasada de arado y posteriormente dos de rastra, a una profundidad de 0.25- 0.30 m (Barrera y Cabrera, 1995).

3.3.3.Siembra

En el ciclo de temporal, el momento más oportuno para sembrar frijol se presenta cuando las lluvias están bien establecidas; esto ocurre normalmente del 15 de junio al 15 de julio. Se deben depositar de 2 a 3 semillas por mata cada 15 o 20 cm en el talud del surco. Los surcos deben tener de 70 a 80 cm de separación, con una densidad aproximada de 75,000 plantas por hectárea (Barrera y Cabrera, 1995).

3.3.4.Dosis de fertilización recomendada para frijol ejotero

Para maximizar el rendimiento del cultivo se debe proporcionar los elementos necesarios de N, P, K en las cantidades adecuadas. De manera general se recomienda la aplicación de la cantidad requerida por el cultivo en dos aplicaciones una al inicio del ciclo del cultivo y la siguiente a los 30 o 14 días después de la siembra (Sacan, 2018).

Se encontraron las siguientes dosis de fertilización para frijol ejotero en la zona del Estado de México (Tabla 18). Las dosis de fertilización reportadas abarcan un rango bastante amplio ya que van de 40-40-00 (Rosales *et al.*, 2001) a 100-100-240 (Mondragón, 2014).

Tabla 18. Dosis de fertilización empleada en el Estado de México.

Dosis de N-P-K	Rendimiento obtenido (t/ha)	Zona geográfica	Referencia
40-40-00	1.0 (junio)	Pabellón, Aguascalientes;	Rosales <i>et al.</i> , 2001
	0.740 (julio)	Texcoco, Edo de México	
50-50-00	22.2 (mayo)	Zacatepec, Morelos;	Campos <i>et al.</i> , 2001;
	9.8 (junio)	Chapingo Edo. de México	Esquivel <i>et al.</i> , 2005
60-100-240	---	---	Mondragón, 2014
80-90-00	9.4	Tenancingo. Edo. de México	Guardiño-González <i>et al.</i> , 2009
100-100-00	2.570	Montecillo Texcoco, México	Díaz <i>et al.</i> , 2010

Sin embargo, estos datos encontrados no se consideraron útiles, ya que no se basan en el suministro de cada suelo y son recomendaciones de las medias regionales.

3.3.5.Demanda nutrimental del cultivo

En la Tabla 19 se muestra el coeficiente de extracción que se requiere de N para rendimiento de una tonelada de ejote, y en la Tabla 20 se puede observar los kilogramos de N; P₂O₅ y K₂O necesarios para producir una tonelada de ejote, ya sea de habito arbustivo o rastrero.

Tabla 19. Coeficiente de extracción de N del ejote.

	Extracción (kg N/t)		Rendimiento (t/ha)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Frijol ejotero	9.2	10.6	7	20

Fuente: Terron (1992) en IDAE (2007).

Tabla 20. Extracciones totales de nutrientes en ejote.

Tipo	Extracción de nutrientes (kg/t de cosecha esperada)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Ejote de mata baja	7.6	2.2	11.8
Ejote de enredadera	4.5	2.0	8.5

Fuente: Segura-Pérez y Contreras-París, (2015).

En la Tabla 21 se muestra los valores de contenido nutrimental y por lo tanto de requerimiento para el desarrollo de una planta de frijol en una etapa madura.

Tabla 21. Contenido nutrimental encontrados en los tejidos (base peso seco) de varios cultivos vegetales.

Cultivo	Parte muestreada	N	P	K %	Ca	Mg	Fe	B	Cu	Zn	Mn
Ejote	Hojas jóvenes	3.0	0.25	1.8	0.8	0.25	300	40	15	30	30
	maduras trifoliadas										
Ejote	Savia en floración completa	0.8	0.2	1.6	--	--	---	--	--	--	--

Fuente: Walsh y Beaton (1983).

De acuerdo con la tabla anterior, para un rendimiento de 10 t ha⁻¹, se necesitarían 300 kg de N, 57 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (25 kg ha⁻¹ de P) y 193 kg de K₂O (160 kg ha⁻¹ de K). Debido a que los porcentajes de contenido y extracción nutrimental son variables, se decidió trabajar con 0.8 % de N (IDEA, 2007), 0.2% de P (Walsh y Beaton, 1983) y 1.6% de K (Walsh y Beaton, 1983).

4. Variables que afectan el rendimiento y desarrollo en el ejote

Fotoperiodo

El rendimiento del frijol varía en función del fotoperiodo (Acosta y White, 1995), la intensidad luminosa (Escalante *et al.*, 2010) y temperatura ambiental (Suzuki *et al.*, 2001). Algunos efectos de la fecha de siembra en frijol ejotero en el valle de México fueron reportados por Esquivel *et al.* (2006), quienes en dos fechas de siembra (21 de mayo y 15 de junio) compararon 36 cultivares de frijol ejotero de los hábitos de crecimiento tipo I, III y IV; observaron que los rendimientos promedio más altos se dieron en plantas sembradas en mayo y los más bajos en junio, esto se le puede atribuir a la temperatura mínima y al fotoperiodo. Álvarez y Baca (1986) en Rosales *et al.*, (2001) recomendaron las siguientes fechas de siembra: a) del 1 de abril al 30 de julio en la meseta central; b) del 1 de octubre al 15 de noviembre en el noreste del país; c) del 1 de septiembre al 30 de enero en las llanuras de Veracruz; d) del 1 de marzo al 30 de julio para la zona de Bajío. Rosales *et al.*, (2001) señalaron que a baja temperatura (9 a 10°) y con la existencia de un incremento en la precipitación, se retrasa la floración en el cultivo del frijol. La fenología, el rendimiento y la calidad nutrimental del frijol ejotero varía en función del clima que se presenta durante el ciclo del cultivo, el rendimiento se relaciona con la acumulación de unidades calor, la evapotranspiración y la radiación fotosintéticamente activa (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009).

El fotoperiodo está relacionado con la temperatura, se obtienen mejores rendimientos cuando las plantas se desarrollan a temperaturas optimas, en el caso del frijol existe una correlación, a mayor temperatura hay mayor actividad de los genes responsables de la respuesta al fotoperiodo, además la respuesta al fotoperiodo durante el invierno (10 a 12.5 horas luz) se ve reflejado en el retraso de la floración en algunas variedades de frijol así como en el aumento de numero de nudos y ramas (Kisakye, 1989).

Temperatura

Los frijoles son generalmente susceptibles a lesiones por bajas temperaturas en todas las etapas de crecimiento. Temperaturas menores a 10°C durante la imbibición y la germinación puede provocar lesiones permanentes y reducir el vigor, mientras se prolongan temperaturas menores a 15 o 16°C o menos puede dar lugar a plantas atrofiadas sin producción. En general, la mayoría de las variedades de frijol necesitan un periodo cada día por encima de los 16°C para que los tubos de polen crezcan lo suficiente para la fertilización y para desarrollo posterior de vainas. Sin embargo, estudios han mostrado que bajas temperaturas nocturnas de 8°C no impide la formación de vainas (Ramírez *et al.*, 2017).

Daño por enfermedades y plagas

Los frijoles son anfitriones de una amplia gama de plagas de insectos, incluyendo las familias Aphidae, Hemiptera y Coleoptera. El daño de los insectos es causado por la alimentación directa que realizan de las hojas, el daño a las vainas en el desarrollo y el daño al tallo por la transmisión de virus; Los patógenos virales relevantes de los ejotes incluyen el virus del mosaico común del frijol (BCMV) y el virus de mosaico del pepino (CMV). Usualmente son los insectos, tales como los áfidos, los trips y las moscas blancas, quienes transmiten los virus. Una vez que se infecta la planta, estos se propagan por ella de manera sistemática, afectando su crecimiento y desarrollo de las vainas. Los síntomas se pueden presentar en incluso en variedades con alta resistencia (Ramírez *et al.*, 2017).

Este mismo autor menciona que en el ciclo de siembras de otoño invierno, durante el inicio del ciclo las temperaturas son cálidas y después más frías, esta condición de variaciones de temperatura puede provocar la reducción de las poblaciones durante este ciclo y al mismo tiempo favorece el incremento de las poblaciones de áfido en la época fría que son vectores de enfermedades.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA

5. Ubicación del ensayo

El ensayo fue establecido en una cubierta plástica en las instalaciones de Ingeniería Agrícola del Departamento de Ciencias Agrícolas en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC), Cuautitlán Izcalli, Estado de México, localizado en las coordenadas 19° 42' de latitud norte y a los 99° 11' de longitud oeste, a una altura de 2,252 msnm.

6. Cultivar utilizado

Para este ensayo se utilizó un cultivar de frijol ejotero denominado “Strike”, cultivado principalmente para ser aprovechado como una hortaliza para consumo fresco, congelado o en conserva. Esta variedad es arbustiva, da vainas rectas y uniformes de color verde claro, de 50-60 días para su cosecha (Seminis, 2020).

7. Características climáticas de la zona

Según la clasificación de Köppen, Cuautitlán Izcalli entra en la categoría de C(w1) que corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, con temperatura media anual de 16° C, con una variación máxima de 27.8° C y como mínima de 5° C, la precipitación anual ronda los 650 mm (García, 2004).

Las temperaturas máximas se presentan en los meses de marzo, abril y mayo con un promedio de temperatura máxima de 26° C y una mínima promedio de 11°C, mientras que las temperaturas mínimas se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero con un promedio de temperatura máxima de 21° C y una mínima promedio de 5°C. La mayor precipitación se presenta en los meses de verano, junio, julio y agosto.

8. Análisis de los suelos

Se utilizaron dos tipos de suelos un Vertisol y un Luvisol, provenientes del estado de México. El Vertisol es un suelo que fue recolectado en las parcelas de la FESC, en Cuautitlán Izcalli, durante las prácticas de la asignatura de fertilidad y manejo de suelos. Para el caso de suelo

Luvisol, este fue recolectado en el municipio de Chapa de Mota en el Estado de México. Ambos suelos se encontraban almacenado en el laboratorio de Fertilidad.

Se mandaron a analizar ambos suelos al Colegio de Postgraduados (COLPOS), las variables que se determinaron fueron el contenido de los siguientes elementos: nitrógeno total (N por el método de Kjeldahl), este valor se multiplicó por 0.02 para transformar a N inorgánico y calcular el suministro del suelo (Pellegrini, 2017); fósforo por el método de Olsen (P); potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) con acetato de amonio 1N a pH 7 y medición por absorción atómica; hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y molibdeno (Mo) por el método de extracción con DTPA (ác. dietilen-triamino-pentaacético) (Anexo 5).

En el laboratorio de Fertilidad y Manejo de Suelos L1-111 se realizó el análisis de las siguientes variables; densidad real (D_r), densidad aparente (D_a), porcentaje de materia orgánica (% MO), porcentaje de carbonatos de calcio (% CaCO_3), capacidad de intercambio catiónico (CIC), conductividad eléctrica (CE), pH y textura de acuerdo con Aguirre-Gómez y Núñez-Balderas (2020).

9. Determinación de la dosis de fertilización

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de ambos suelos se determinó mediante el Método Sistemático Racional la dosis de fertilización, utilizando la fórmula correspondiente. La demanda se calculó para un rendimiento de 10 ton ha^{-1} a partir del porcentaje del contenido de N, P y K. El suministro se calculó a partir del análisis del suelo.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\text{Dosis de fertilización} = \frac{\text{Demanda (kg ha}^{-1}) - \text{Suministro (kg ha}^{-1})}{\text{Eficiencia de fertilización (\%)}} * 100\%$$

10. Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con un total de 10 macetas para cada tipo de suelo, las unidades experimentales fueron macetas de 20*11*13 cm, con capacidad de 4.4 litros con dos plantas de frijol ejotero variedad Strike cada una.

Los tratamientos son: testigo (T0) donde no se aplicaron fertilizantes; uno (T1) que fue la aplicación de la dosis de fertilización calculada de acuerdo con la demanda y suministro; dos (T2) el cual fue 1.5 veces la dosis del T1. Para T0 se emplearon 2 repeticiones (2 macetas con un total de 4 plantas), para el T1 y T2 se emplearon 4 macetas cada uno, con un total de 8 plantas por tratamiento.

Los tratamientos para cada suelo y la cantidad de nutriente aplicado se muestran en la Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22. Dosis de fertilización calculada para Vertisol.

Tratamientos	TV0	TV1	TV2
N	Sin aplicación	$Df_N \times 1.0$	$Df_N \times 1.5$
P	Sin aplicación	$Df_P \times 1.0$	$Df_P \times 1.5$
K	Sin aplicación	$Df_K \times 1.0$	$Df_K \times 1.5$

Dosis aplicada por cada unidad experimental corresponde a 2 plantas por maceta (1 maceta = 4.1 L).

Tabla 23. Dosis de fertilización calculada para Luvisol.

Tratamientos	TL0	TL1	L2
N	Sin aplicación	$Df_N \times 1.0$	$Df_N \times 1.5$
P	Sin aplicación	$Df_P \times 1.0$	$Df_P \times 1.5$
K	Sin aplicación	$Df_K \times 1.0$	$Df_K \times 1.5$

Dosis aplicada por cada unidad experimental corresponde a 2 plantas por maceta (1 maceta = 4.1 L).

11. Plan de manejo del cultivo y elaboración de calendario fenológico del ejote

De acuerdo con la fenología del cultivo de frijol ejotero se elaboró un calendario de actividades que se muestra en la Tabla 24. La aplicación de fertilización se hizo de manera fraccionada en dos fases, la primera fertilización se realizó durante la siembra, se aplicó un 30% del nitrógeno y el 100% de P y K, la segunda aplicación de fertilizante se realizó cuando las plantas mostraron el desarrollo de la tercera hoja trifoliada, en esta etapa se aplicó el resto del nitrógeno (70%).

Se hizo un monitoreo de la fenología del cultivo, tomando en cuenta las siguientes variables: días a germinación, emergencia, aparición de hojas primarias, aparición de la 1ª hoja trifoliada, aparición de la 3ª hoja trifoliada, prefloración, floración, formación de vainas y cosecha.

Tabla 24. Calendario de actividades previstas.

Fenología			
Siembra	Inicio	Duración promedio	Actividad
Germinación (V0)	02-oct-19	0	Siembra y fertilización
Emergencia (V1)	02-oct-19	5	
Hojas primarias (V2)	07-oct-19	2	
1a hoja trifoliada (V3)	09-oct-19	4	
3a hoja trifoliada (V4)	12-oct-19	9	2a fertilización y aporque
Prefloración (R5)	19-oct-19	15	
Floración (R6)	30-oct-19	10	
Formación de vaina (R7)	09-nov-15	6	
1a Cosecha	14-nov-19	9	Cosecha
	22-nov-19	0	
Total, de días		60	

Se realizaron las actividades de manejo de cultivo de acuerdo con la fenología y calendario de actividades antes mencionado en la Tabla 24. Adicionalmente se mantuvo un registro de las variables fenológicas contando los días después de siembra (DDS) de: germinación, emergencia, aparición de hojas primarias, desarrollo de la 1ª y 3ª hoja trifoliada, floración,

formación de la vaina y las cosechas, con el fin de observar si existen una variación del desarrollo fenológico del cultivo.

Los riegos se realizarán cada 3 o 4 días aplicando 100ml de agua por maceta; La cosecha se realizó cuando las vainas alcanzaron su máximo crecimiento y antes del llenado completo de las vainas.

12. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para cada variable (número de vainas, peso fresco, peso seco, altura de vainas, altura) por tratamiento y pruebas de medias por el método de Dunnet, considerando un nivel de significancia de 0.05. Los procedimientos se realizaron en el software estadístico Minitab®. Cada suelo fue evaluado de manera independiente, en dos niveles de fertilización y un testigo, respectivamente, debido a que como se mencionó anteriormente los suelos no pueden compararse porque tienen diferentes factores de formación y características.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

13. Resultados del análisis de suelo e interpretación

En los siguientes puntos se describirán las tablas donde se muestran los resultados obtenidos del análisis de suelo Vertisol y Luvisol

Análisis químico del suelo Vertisol

La densidad aparente (D_a) del suelo fue de 1.2 g cm^{-3} , el cual está dentro del rango de densidades aparentes normales y que no afectan el crecimiento radicular de las plantas (Arshad, 1996) y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) entra en la clase de suelos francos.

El contenido de carbonato de calcio fue alto, ya que el valor que se obtuvo de 39% CaCO_3 , entra en un rango de entre 16-40% de CaCO_3 , conforme a los valores dados por la de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

El contenido de materia orgánica (MO) fue de 3%, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) indica que se encuentra en un rango de contenido medio, lo cual favorece la estructura del suelo y no representa un problema significativo o de carencia de MO.

Los Vertisoles según Coulombe *et al.*, (1996), tienen una CIC relativamente alta con rangos que van de 20 a 45 cmol kg^{-1} o más. Una CIC baja en Vertisoles se atribuye a un contenido de arcilla bajo, un bajo contenido de esmectita, caolinita, illita u otros minerales con bajo contenido de CIC. Los factores responsables de una baja CIC pueden ser la mineralogía heredada, las condiciones climáticas húmedas y/o condiciones de lixiviación ácida que favorecen arcillas de baja actividad (Coulombe *et al.*, 1996). Los valores de CIC que se obtuvo de este suelo corresponden a un suelo con mediana-alta fertilidad de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) y Valero (1994).

La conductividad eléctrica fue baja, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), entra en la clasificación de no salino, ya que el valor obtenido es

menor a 1.0 dS m^{-1} , lo que supone un efecto imperceptible en el frijol ejotero, la salinidad en este caso es insignificante.

La mayoría de los Vertisoles son suelos con pH neutro o básico con un rango de valores que van de 6.0 a 8.0 (Coulombe et al., 1996; Driessen et al., 2001). De acuerdo con el análisis de suelo, el Vertisol resulto ser un suelo con pH medianamente alcalino, con un valor de 7.65, lo que se traduce en que es óptimo para el crecimiento de diferentes cultivos, sin embargo, se corre el riesgo de baja disponibilidad de micronutrientes de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Gonzales (2002) menciona que el ejote se desarrolla óptimamente en un rango de pH de 5.5 a 7.0. Lo antes mencionado puede haber repercutido en el desarrollo del cultivo y su rendimiento.

Tabla 25. Contenido nutricional de suelo Vertisol.

Elemento	Vertisol	Unidad
Ca	18.5	cmoles ⁽⁺⁾ /kg
Mg	9.8	
Na	0.5	
Fe	41	
Cu	2.5	ppm
Zn	19.8	
Mn	67	

Tabla 26. Características químicas de suelo Vertisol.

Suelo	Vertisol	Interpretación
Densidad aparente	1.2 gr/cm ³	Suelo franco
Capacidad de campo	39%	
MO	3%	Contenido medio Mediana a alta fertilidad
CIC	25cmol ⁽⁺⁾ /kg	
CE	0.13 dS/m	Baja Medianamente alcalino
pH	7.65	

Donde: MO es materia orgánica, CIC es capacidad de intercambio catiónico y CE es conductividad eléctrica.

13.1. Análisis químico del suelo Luvisol

La densidad aparente del suelo es de 1.3 g cm⁻³, se encuentra en el rango de densidades que no afectan el crecimiento radicular de las plantas, según Arshad (1996) y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) la densidad aparente de Luvisol empleado pertenece a la clase de suelos francos.

El contenido de carbonato de calcio fue alto, ya que entra en un rango de entre 16 - 40%, con un 30%, conforme a los valores dados por la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

El contenido de MO es de 2%, este valor indica que el porcentaje entra en el rango de valores medio de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), este valor indica una buena estructura del suelo y por lo tanto un desarrollo adecuado de plantas.

La CIC fue baja, ya que entra en el rango de entre 5-15 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), con una CIC de 7.6 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹, se traduce en un suelo que requiere un aporte importante de materia orgánica para elevar su CIC. Dado este resultado se requiere aumentar la MO al 7% para tener una CIC de 25 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹,

mediante el aporte de 32 camiones de materia orgánica, los cálculos se pueden consultar en el apartado de anexos.

La CE fue baja de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), con un valor de 0.13 dS m^{-1} , entra en el rango inferior a 1 dS m^{-1} ; se traduce en un suelo no salino y tiene efectos casi despreciables en el cultivo, es una CE aceptable para el crecimiento de diferentes cultivos según Motsara *et al.*, (2008) y SEMARNAT, (2002). Se debe considerar que el cultivo de frijol ejotero reduce su rendimiento cuando se desarrolla en suelos con $\text{CE} > 0.90 \text{ dS m}^{-1}$ (USDA, 1999).

En esta muestra de suelo, el Luvisol resultó ser moderadamente ácido con pH de 6.5, de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002); comúnmente los valores de pH entre 6.0 y 7.5 son óptimos para el crecimiento de la mayoría de los cultivos. En este suelo el pH se acerca al óptimo para el desarrollo adecuado del ejote, que requiere un pH con rango de 5.0 a 7.0. Cabe mencionar que los valores de pH típicos de Luvisoles varían de acuerdo con el material parental, pero se encuentran en un rango de 6.1 a 6.6 en los horizontes superficiales (Driessen *et al.*, 2001).

Tabla 27. Contenido nutricional de suelo Luvisol.

Elemento	Luvisol	Unidad
Ca	5.8	cmoles ⁽⁺⁾ /kg
Mg	2.1	
Na	0.1	
Fe	36	
Cu	0.8	Ppm
Zn	1.2	
Mn	67	

Tabla 28. Características químicas de suelo Luvisol.

Suelo	Luvisol	Interpretación
Densidad aparente	1.3 gr/cm ³	Suelo franco
Capacidad campo	30%	
MO	2%	Contenido medio
CIC	7.6 cmol ⁽⁺⁾ /kg	Baja
CE	0.13 dS/m	Baja Moderadamente ácido
pH	6.5	

Donde: MO es materia orgánica, CIC es capacidad de intercambio catiónico y CE es conductividad eléctrica.

13.2. Cálculo de la demanda

La demanda nutrimental (kg/kg) es la cantidad de nutrimento que extrae el producto de interés, es decir, los kg de nutrimento por kg de producto ya sea fruto, grano o follaje de interés (Alonso y Gálvez, 2013).

Debido a que no se encontraron datos del requerimiento interno de N, P y K para el cultivo del frijol ejotero, se recurrió al contenido nutrimental cuando la planta se encuentra en plena floración (Hochmuth *et al.*, 2015). Conforme a Walsh y Beaton (1983) estos valores son en promedio de 3.0 %N, 0.25 % de P y 1.8 % de K. En la Tabla 29 se muestra la demanda del cultivo para el rendimiento meta del Edo. de México.

Tabla 29. Demanda del cultivo de frijol ejotero

Rendimiento* esperado (kg/ha)	kg/ha				
	N	P	P₂O₅	K	K₂O
1 000	7.9	2.0	4.6	16.0	19.2
10 000	79.0	20.0	46.0	160.0	192.0

*El rendimiento meta es el promedio para el estado de México.

13.3. Cálculo del suministro en suelo Vertisol y Luvisol

El suministro o aporte del suelo (kg ha^{-1}) se obtiene mediante un análisis químico del suelo, el cual indica la cantidad de cada nutrimento disponible en el suelo. En la Tabla 30 se puede observar los contenidos de N, P y K arrojados por el análisis químico de los suelos.

El contenido de N para el suelo Vertisol se encontró en un rango bajo con 0.13 % N total, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) en este suelo se recomienda la aplicación de este nutriente. Con respecto al suelo Luvisol, el contenido de N fue alto con un valor de 0.4%, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), y donde no existe la necesidad de añadir este elemento en el plan de nutrición.

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) el contenido de P fue alto en suelo Vertisol, con $57 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$; mientras que para el Luvisol fue bajo, con $2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$.

El contenido de K fue alto en el suelo Vertisol con $0.09 \text{ cmol kg}^{-1}$ y en el caso del suelo Luvisol fue medio con $0.05 \text{ cmol kg}^{-1}$, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Tabla 30. Contenido de N-P-K

Elemento	Vertisol	Luvisol
N total (%)	0.13	0.4
P (ppm)	57	2
K (cmol/kg)	0.09	0.05

De acuerdo con los valores obtenidos del análisis de suelo se hizo el calculo para determinar el contenido total en una hectárea, se realizó de la siguiente manera.

Los valores de cada elemento (N, P, K) se convirtieron a kg ha⁻¹ para calcular el contenido de estos elementos en una hectárea de suelo se emplearon las siguientes condiciones: profundidad de 20 cm, 1200 kg m⁻³ y 1300 kg m⁻³ de densidad aparente, para el Vertisol y el Luvisol respectivamente. Los valores obtenidos se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 31. Contenido de N, P y K en un suelo Luvisol y un Vertisol.

Elemento	Vertisol	kg/ha	Luvisol	kg/ha
N*	0.0026%	62.4	0.008 %	208
P	57 ppm	13.7	2 ppm	5.2
K	0.9 cmol ⁽⁺⁾ /kg	84.2	0.5 cmol ⁽⁺⁾ /kg	50.7

*El N inorgánico se calculó multiplicando 0.02 por el valor del N total (Pelligrini, 2017)

Cálculos para el suministro del suelo Vertisol

$$\frac{kgN}{ha} = \frac{0.0013kgNtotal}{1kgs} \times \frac{0.02 kgN}{1 kgN total} \times \frac{1,200 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} = \frac{62.4 kgN}{ha}$$

$$\frac{kgP}{ha} = \frac{57 mgP}{1 kgs} \times \frac{1,200 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{1kgP}{10^6mgP} = \frac{13.7 kgP}{ha}$$

$$\begin{aligned} \frac{kgK}{ha} &= \frac{0.09 cmol_{(+)}K^+}{kgs} \times \frac{1,200 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{39cgK}{1cmol_{(+)}K^+} \times \frac{1kgK^+}{10^5cgK^+} \\ &= \frac{84.2kgK}{ha} \end{aligned}$$

Cálculos para el suministro del suelo Luvisol

$$\frac{kgN}{ha} = \frac{0.004kgN}{1kgs} \times \frac{0.02 kgN}{1 kgN total} \times \frac{1,300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} = \frac{208kgN}{ha}$$

$$\frac{kgP}{ha} = \frac{2 mgP}{1 kgs} \times \frac{1300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{1kgP}{10^6mgP} = \frac{5.2kgP}{ha}$$

$$\begin{aligned} \frac{kgK}{ha} &= \frac{0.05 cmol_{(+)}K^+}{kgs} \times \frac{1300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{39cgK}{1cmol_{(+)}K^+} \times \frac{1kgK^+}{10^5cgK^+} \\ &= \frac{50.7kgK}{ha} \end{aligned}$$

13.4. Cálculo de la dosis de fertilización

De acuerdo con la Tabla 32 la dosis de fertilización para obtener un rendimiento de 10 t ha⁻¹ de fríjol ejotero para el suelo Vertisol es de 21-25-126 y para el suelo Luvisol de 00-59-182 como se observa en la Tabla 33.

Tabla 32. Requerimiento de NPK para el suelo Vertisol

Elemento	Demanda kg/ha	Suministro	Eficiencia de fertilización	Requerimiento de fertilizante kg/ha
N	79	62.4	80	20.6
P	20	13.7	25	25.2
K	160	84.2	60	126.3

Tabla 33. Requerimiento de NPK para el suelo Luvisol

Elemento	Demanda kg/ha	Suministro	Eficiencia de fertilización %	Requerimiento de fertilizante kg/ha
N	79	208.0	80	-161.25
P	20	5.2	25	59.2
K	160	50.7	60	182.2

En la Tabla 34 se puede observar entonces la dosis de fertilización para el tratamiento 1 (T1) y tratamiento (T2) para ambos suelos, se convirtieron los datos de requerimientos de NPK en dosis de N-P₂O₅-K₂O, que son las formas en la que se encuentran los fertilizantes.

Tabla 34. Dosis de fertilización para cada tratamiento en suelo Vertisol y Luvisol

Suelo	T1 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	T2 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
	kg/ha	
Vertisol	21-58-152	32-87-228
Luvisol	00-136-214	00-204-321

*Se empleó el factor de conversión de 2.3 para convertir de kg P ha⁻¹ a kg P₂O₅ ha⁻¹; y de 1.2 para convertir de kg K ha⁻¹ a kg K₂O ha⁻¹.

La dosis que se mostró en la tabla anterior es pensada para una densidad de plantación de aproximadamente 75,000 plantas por hectárea de frijol ejotero de habito tipo I.

Etchevers y Padilla, (2012) mencionan que la generación de recomendaciones de fertilizantes se puede hacer mediante varios enfoques, algunos de estos requieren de una gran cantidad de trabajos experimentales y no se apoyan de los análisis químicos de suelos, pero sí de un trabajo estadístico previo y complejo; otros se basan también en el trabajo experimental en campo y apoyándose de los análisis químicos, un tercer grupo se fundamenta en la formulación de modelos conceptuales o de funcionamiento del proceso de la nutrición, que requieren ser validados en campo con ensayos; y finalmente hay un tipo de estrategia, llamado extrapolación, que es la de menor exactitud, que no precisa ni de ensayos de terreno ni de análisis químicos ni de apoyo estadístico. Los antes mencionado sustenta que se requieren de realizar varios ensayos para determinar una dosis de recomendación precisa.

13.5. Selección de fertilizantes

Los fertilizantes empleados para cada suelo fueron los siguientes:

Suelo Vertisol

Para cubrir la demanda en el suelo Vertisol, de nitrógeno se empleó la urea (45-00-00), para el fósforo se empleó fosfato diamónico o DAP (18-46-00) y para el potasio se empleó sulfato

de potasio sulfoK (00-00-50) como se observa es la Tabla 35. La urea y el DAP son fertilizantes de velocidad de reacción rápida y con un efecto ligeramente ácido y ácido respectivamente, el sulfato de potasio es de rápida velocidad de reacción y efecto neutro en el pH del suelo.

Suelo Luvisol

Este suelo resultó tener un contenido alto de N, por lo que no requería aporte de este elemento, para cubrir la demanda de fósforo se utilizó fosfato mono potásico (00-52-34) y para el requerimiento de potasio se empleó sulfato de potasio (00-00-50) que tiene un efecto ácido de acuerdo con Crouse y Denny (2015).

Se escogieron estos fertilizantes porque son los que se encuentran disponibles en el almacén de la Facultad. Las dosis empleadas de fertilizantes para este suelo se pueden ver en la Tabla 35.

Tabla 35. Fertilizantes empleados en el ensayo.

Vertisol		
Fertilizante	Tratamiento 1*	Tratamiento 2*
UREA	1.42 g	2.13 g
DAP	2.27 g	3.4 g
K ₂ SO ₄	8.5 g	12.8 g
Luvisol		
UREA	-	-
KH ₂ PO ₄	7.78 g	11.67 g
K ₂ SO ₄	10.71 g	86.1 g

* Dosis aplicada por cada unidad experimental (1 maceta de 4.10 kg de suelo, con 2 plantas).

14. Fenología del cultivo

Se llevó un registro de la fenología de las plantas de ejote, el cual se puede observar en la Figura 12, donde se compara el comportamiento ideal de la duración de cada etapa con el observado *in situ*.

Geminación

Se realizó una prueba de germinación antes de comenzar el ensayo y se obtuvo un 90% de germinación en cinco días. Sin embargo, en el primer establecimiento del ensayo la germinación fue dispareja, en el suelo Vertisol ocurrió a los siete días, mientras que el Luvisol ocurrió a los 12-15 días. En el segundo sitio de establecimiento la germinación fue homogénea y ocurrió entre los cinco y seis días.

Días a floración

En óptimas condiciones y en temporada de primavera verano los DDS para floración son en promedio 45-50. En el ensayo los días a floración se alargaron y se alcanzó hasta los 56 días.

Cosecha

La primera cosecha se realizó a los 72 DDS, mientras que lo normal para esta variedad es de 55-60 DDS, por lo que el ciclo del cultivo en el ensayo se alargó 12 días, la principal causa es porque se desarrolló durante el invierno.

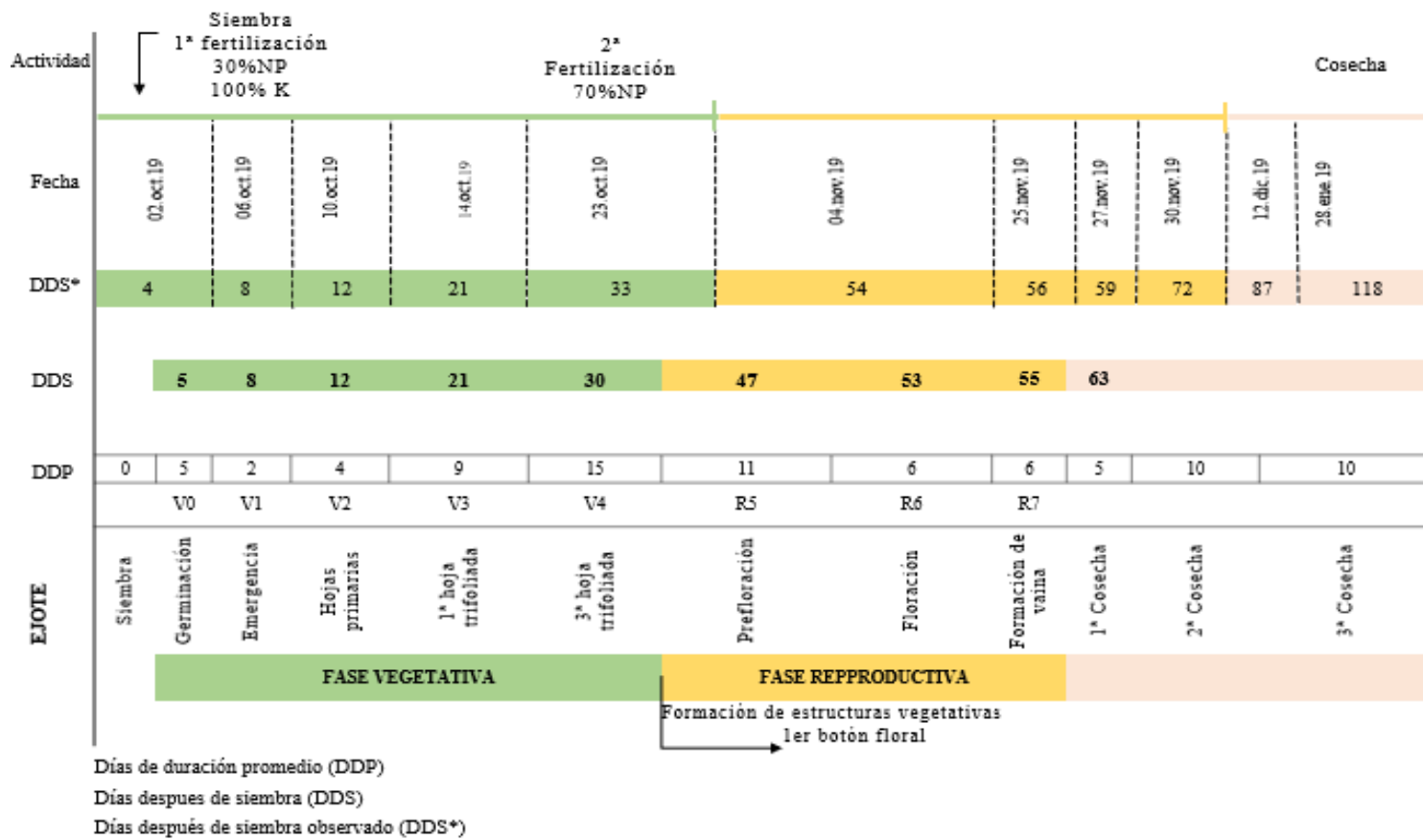


Figura 12. Fenología de ejote durante el ensayo y su comparación con un comportamiento fenológico promedio.

15. Discusión. Variables que afectaron el rendimiento del frijol ejotero

Las variables que afectaron el rendimiento esperado de 132 gr por planta o 10 toneladas por hectárea son, de acuerdo con la literatura citada, los siguientes aspectos: en el frijol el fotoperiodo, la temperatura, el genotipo, disponibilidad de nutrientes, humedad, plagas y enfermedades, así como las interacciones de estos factores son elementos importantes que condicionan la expresión de las características fenológicas y de rendimiento (Campos-Escudero *et al.*, 2002).

Estos aspectos se explican en los siguientes puntos, considerando importante el lugar donde se llevó a cabo el experimento, posteriormente el lector podrá entrar en detalle con la discusión de los resultados del objetivo de este trabajo

15.1. Efecto de la luz en invernadero de cristal y cubierta plástica.

Como se mencionó en la metodología, el ensayo estaba previsto para llevarse a cabo en un invernadero de cristal, sin embargo, el techo de cristal estaba pintado de color blanco, lo que impidió la entrada directa de luz y provocó que en el primer establecimiento del cultivo las plantas se desarrollaran de manera dispareja, como se puede apreciar en la Figura 13.

En un primer establecimiento del ensayo efecto de esta condición (invernadero de cristal) influyó en el tiempo de germinación en ambos tipos de suelo, siendo completamente diferente, en el suelo Vertisol la germinación ocurrió a los 7 DDS y a los 12 DDS las plantas ya habían desarrollado las hojas primarias Figura 13 (A), mientras que, en el suelo Luvisol (suelo de color claro) ocurrió a los 12 DDS Figura 13 (B). Este efecto fue posiblemente causado por la luz, ya que de acuerdo con Botto (1988), al reducirse la luz directa también se reduce la temperatura del suelo de color más claro, luvisol, lo que ocasiona que la temperatura de germinación sea menor y poco favorable. Para un suelo de color claro, los efectos de la luz sobre la ruptura de la dormición de las semillas dependen de la temperatura del suelo por lo que la tasa de germinación es afectada.

Por otro lado, cuando el ensayo se repitió en otro sitio, dentro de una cubierta plástica, la germinación fue homogénea, a los 5-6 DDS para ambos suelos. Se observó que el desarrollo

fue ligeramente diferente, ya que las plantas en suelo Luvisol tenían menor tamaño y desarrollo de hojas a los 20 DDS Figura 13 (C y D).



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 13. Comparación del desarrollo del ejote en invernadero de cristal y en cubierta plástica.

A) Desarrollo de hojas primarias 12 DDS en suelo Vertisol. *

B) Salida de las hojas dicotiledóneas a 12 días después de la siembra en suelo Luvisol. *

C) Desarrollo de primeras hojas trifoliada a los 20 DDS en suelo Vertisol. **

D) Desarrollo de primeras hojas trifoliadas a los 20 DDS. **

*Macetas en invernadero de cristal.; ** Macetas en cubierta plástica.

15.2. Efecto del fotoperiodo

El efecto del fotoperiodo condicionó en parte el desarrollo óptimo del cultivo ya que las horas de luz durante el invierno son menos que en primavera o verano (con 10.0 -12.5 horas de luz) (Esquivel-Esquivel et al., 2006), esta condición retrasó la floración en el ensayo por 11-15 días, y por lo tanto el llenado de fruto se llevó a cabo en los días más fríos.

15.3. Efecto de la temperatura

El experimento se llevó a cabo dentro de una cubierta plástica, en la época de otoño invierno, se sabe que el frijol ejotero se desarrolla a una temperatura promedio de 25°C y con largos periodos de luz, en la época en la que se desarrolló el experimento se presentaron lluvias y temperaturas externas variables, por lo que la época ideal para cultivar es en primavera verano con temperaturas más cálidas y más horas luz. La baja temperatura (<17.3°C) retrasa la madurez fisiológica y reduce el rendimiento (Esquivel *et al.*, 2006). A medida que se reduce la temperatura mínima, el número de días a floración se incrementa, las bajas temperaturas retrasan la floración y la madurez (Ramírez *et al.*, 2017), que es lo que ocurrió en el ensayo porque se llevó a cabo en los meses más fríos del año.

El alargamiento de las cosechas se vio afectado por el estrés causado por el frío en la fase de reproducción, es decir, en la floración, ya que los cortes se realizaron en el mes más frío de año, enero, con una normal de 12° C de acuerdo con el Sistema Meteorológico Nacional, esto se asocia en gran medida con el desarrollo anormal de flores y de vainas (Koutsika-Sotiriou y Traka-Mavrona, 2008). Además, se observaron vainas muy pequeñas (5 cm aproximadamente) que se desprendían.

Estos factores causaron el retraso del desarrollo fenológico del cultivo, ya que, de ser un cultivo que en promedio es cosechado a los 55-60 DDS, en este experimento se comenzó a cosechar a los 72 DDS, teniendo un retraso de 12 días y una producción baja de flores.

15.4. Daño por enfermedades y plagas

Durante el experimento se observaron mosquitas blancas en las primeras semanas del ciclo del cultivo, se aplicó Karate para su control, el cual resulto efectivo; se sabe que las mosquitas blancas favorecen el desarrollo de virosis en el frijol (Ramírez *et al.*, 2017), después de la aplicación se observó una reducción de las poblaciones de estos vectores, pero a las 3 semanas siguientes se observaron pulgones, los cuales fueron controlados con agua y jabón, manualmente.

En la cuarta semana se observó la aparición de síntomas de virus de mosaico (Figura 14) esto se relaciona con la aparición previa de mosquita blanca y pulgones.



Figura 14. Síntomas de virosis en hoja de ejote.

Con respecto a los antes mencionado y al observar el daño en plantas, estas tuvieron que ser apartadas y eliminadas del experimento lo que disminuyó el número de repeticiones.

15.5. Efecto de las condiciones de la cubierta plástica

Como ya se había mencionado, la cubierta plástica donde se encontraba el experimento se encontraba dañado (presencia de hoyos), lo que provocaba que entrara agua, el ensayo fue colocado en el mes de octubre, final de la temporada de lluvias. Considerando que el nitrato se lixivias fácilmente del suelo cuando existen altas precipitaciones o riego excesivo, se

deduce que la situación mencionada repercutió en el rendimiento final del ejote (Horneck *et al.*, 2011).

16. Rendimiento

Uno de los motivos por los que no se logró el adecuado desarrollo y obtención de rendimiento esperado fue la época, falta de horas luz y condiciones desfavorables de la cubierta plástica, ya que, se observó que tenía aberturas por donde entraba el agua de lluvia, en algunas ocasiones también se observó que las macetas estaban inundadas a causa de lo antes mencionado. El exceso de agua o inundación es una vía posible para la pérdida de nitrato y por lo tanto el aprovechamiento ineficiente (Coulombe *et al.*, 1996).

16.1. Rendimiento de ejote en suelo Vertisol

En los dos diferentes niveles de fertilización realizada en el suelo Vertisol, se obtuvo que, el tratamiento que produjo un mayor número de vainas fue el TV2 con un promedio de 8.3 vainas por planta (Figura 15; A), por lo tanto también una mayor producción de peso fresco con 35.55 g de vainas y peso seco con 3.16 g por planta (Figura 15; C y D); fue el tratamiento al que se le aplicó cantidad más elevada de nutrientes; por otro lado, no hay diferencia significativa entre el tratamiento testigo TV0 y el tratamiento TV1 para los aspectos antes mencionados.

Con respecto a la altura de las vainas, estadísticamente resultaron iguales con un promedio de 10 cm en todos los tratamientos, cabe mencionar que las vainas del tratamiento TV2 alcanzaron ligeramente una mayor altura (Figura 15; B). En cuanto a la altura de la planta, son estadísticamente iguales con un promedio de 31 cm.

Para las plantas que se desarrollaron en suelo Vertisol en los diferentes niveles de fertilización, el tratamiento que produjo el mayor rendimiento corresponde a tratamiento TV2 con una fertilización de N (0.81g); P (1.56 g) y K (6.37) para cada planta.

Se realizó la comparación de medias de Dunnett ($P < 0.05$) en el programa Minitab 17 a partir de ello se obtuvieron las siguientes graficas A, B, C, D y E (Figura 15).

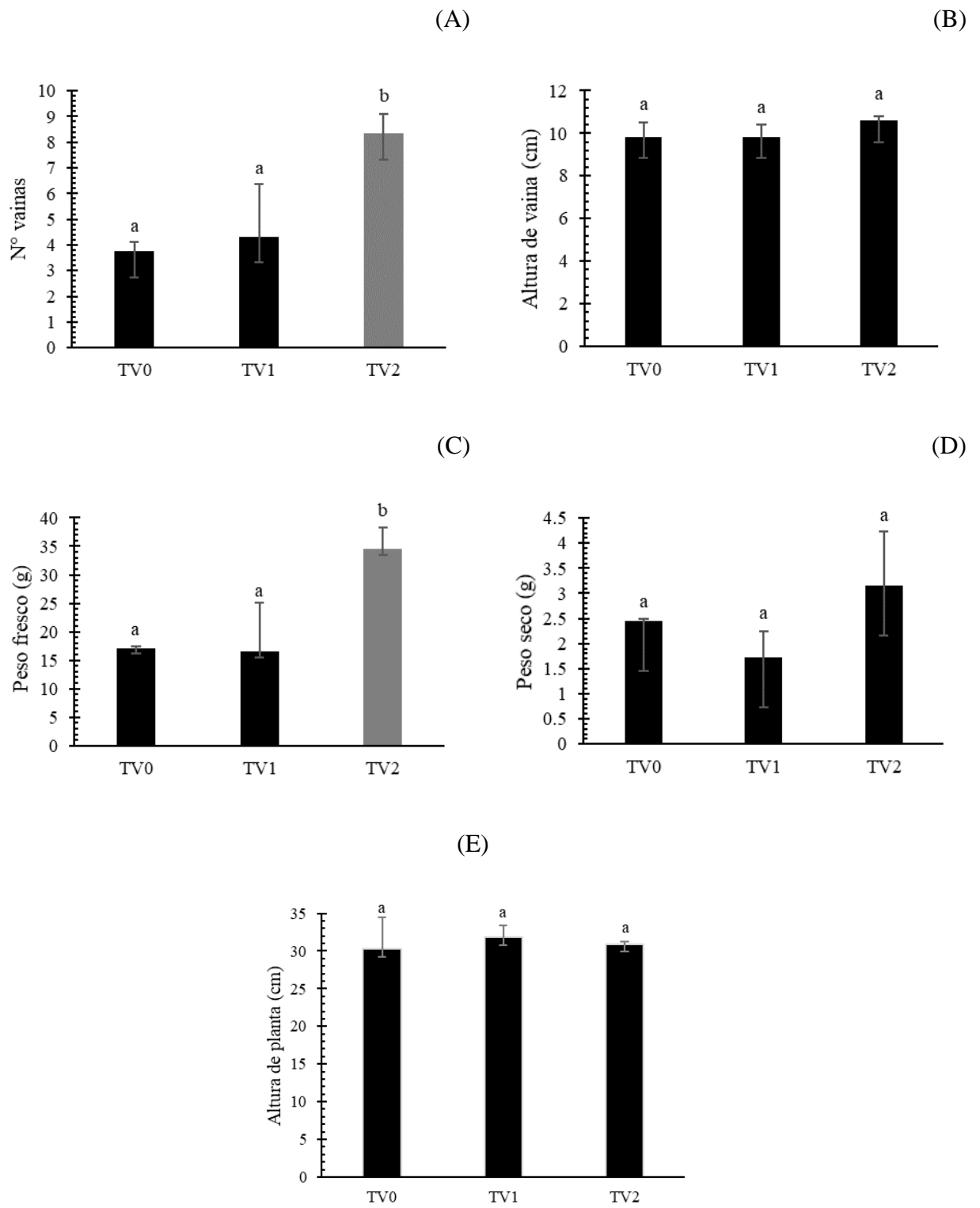


Figura 15. Variables evaluadas por planta de frijol ejotero en suelo Vertisol.

- A) Número de vainas por tratamiento.
- B) Altura de vainas por planta por tratamiento.
- C) Peso fresco de vainas por planta por tratamiento.
- D) Peso en seco de vainas por planta.
- E) Altura de planta

Donde TV0 es tratamiento testigo; TV1 es el tratamiento 1 con la dosis de fertilización calculada; TV2 es el tratamiento 2 con 1.5 veces la dosis calculada.

La letra b representa los tratamientos que son significativamente diferentes al control (TV0).

16.2. Rendimiento de ejote en suelo Luvisol

Para las plantas que se desarrollaron en suelo Luvisol el efecto de los diferentes niveles de fertilización no fueron estadísticamente significativo para cada uno de los datos tomados, sin embargo, el testigo TL0 fue el que alcanzo mayor número de vainas (Figura 16; A), mayor peso fresco (Figura 16; C) y mayor peso seco (Figura 16; D), en cuanto a la altura de vainas, el tratamiento TL2 alcanzo el promedio máximo con 10.18 cm (Figura 16; B). Con respecto a la altura de la planta el promedio de los tres tratamientos es de 28.6 cm.

En el tratamiento TL1 y TL2 se observa que los valores obtenidos para cada variable de rendimiento son muy similares (Figura 16).

En el suelo Luvisol todas las variables cuantificadas fueron iguales estadísticamente.

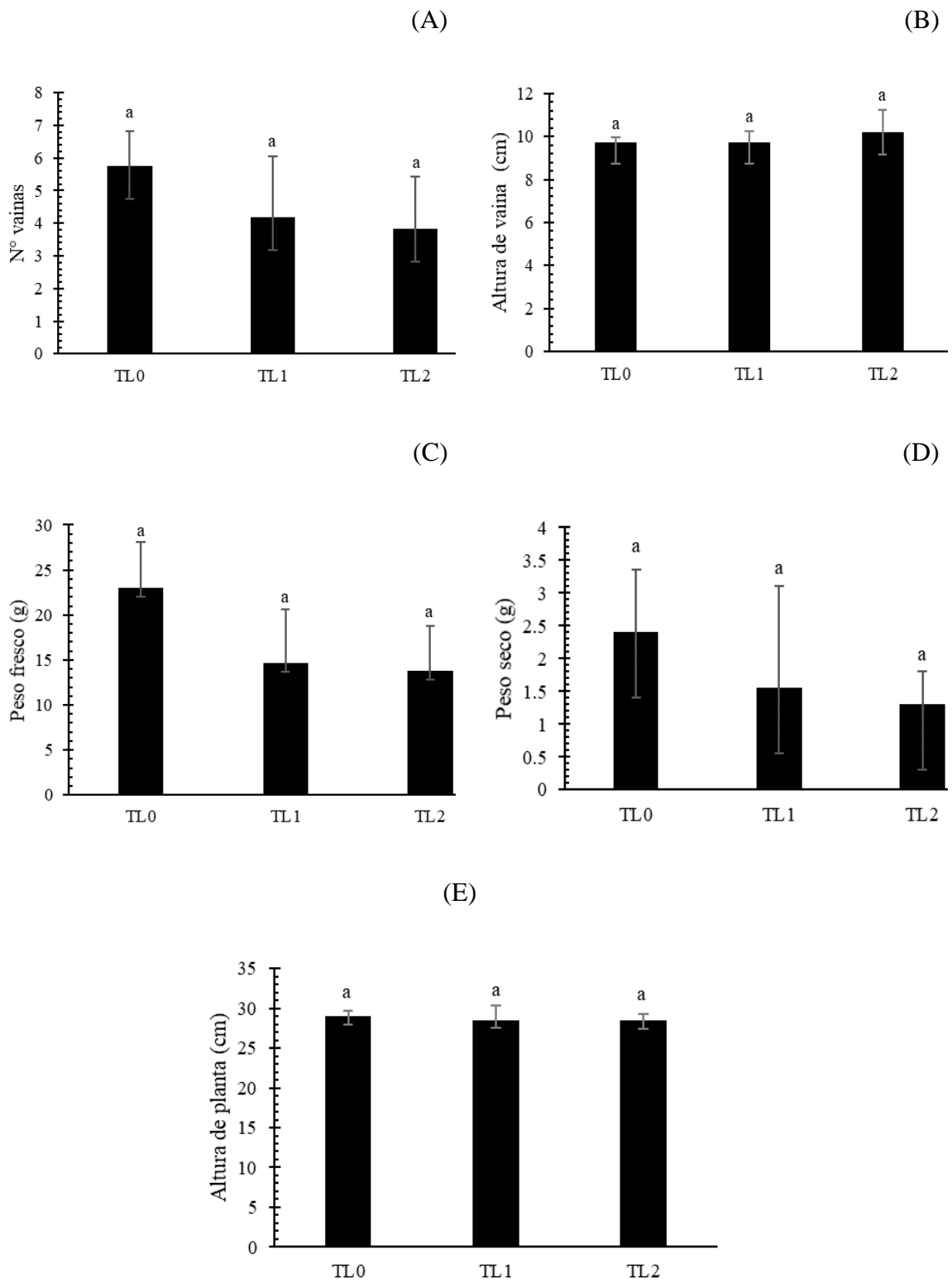


Figura 16. Variables evaluadas por planta de frijol ejotero en suelo Luvisol.

A) Número de vainas por plantas por tratamiento.

B) Altura promedio de planta por tratamiento.

C) Peso fresco promedio por planta por tratamiento.

D) Peso fresco promedio por planta por tratamiento.

Donde TL0 es tratamiento testigo; TL1 es el tratamiento 1 con la dosis de fertilización calculada; TL2 es el tratamiento 2 con 1.5 veces la dosis calculada.

La letra a representa a los tratamientos que son estadísticamente iguales.

Cuando la planta de frijol se desarrolla a bajas temperaturas nocturnas y temperaturas altas durante el día, lo cual ocurrió durante su desarrollo, la producción y el tamaño de la vaina tiene a ser más pequeño, a temperaturas diarias de 22°C el tamaño de las vainas es mayor (Ramírez *et al.*, 2017), esta situación explica el tamaño de las vainas obtenidas durante el experimento, el promedio de longitud de vaina para cada tipo de suelo fueron de 9.5 a 10.5 cm para ambos tipos de suelo, comparando con que el tamaño comercial del ejote (var. Strike) es de 14 cm (Seminis, 2020).

16.3. Diferencias entre ambos suelos

A pesar de haberse aplicado la cantidad total de nutrientes requeridos por la planta para su desarrollo, basado en su contenido nutrimental y el contenido de nutrientes de los suelos, los resultados esperados no cumplieron con la meta de 10 ton ha⁻¹. Ambos suelos difieren en los valores de las variables de rendimiento evaluadas en los dos diferentes niveles de fertilización. En la Figura 17 se compararon las medias de rendimiento en peso fresco en ambos suelos, y en las dos dosis.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que, de acuerdo con Virgilio (2003), las variedades de crecimiento determinado alcanzan hasta 6 ton ha⁻¹, como es el caso de la variedad Strike. Los rendimientos para plantas desarrolladas en suelo Vertisol fueron; para TV0 1.3 ton ha⁻¹; para TV1 1.2 ton ha⁻¹ y para TV2 2.6 ton ha⁻¹; y para el suelo Luvisol fue en TL0 1.7 ton ha⁻¹; en TL1 1.1 ton ha⁻¹ y por último para TL2 el rendimiento fue de 1.0 ton ha⁻¹.

En las siguientes graficas se muestra la comparación de rendimiento en ambos suelos. El tratamiento donde se obtuvo mayor peso fresco (g) por planta fue en tratamiento TV2 del suelo Vertisol con 34.55 g. En el tratamiento testigo (T0) las plantas que se desarrollaron el suelo Luvisol obtuvieron mayor rendimiento (23 g) en peso fresco por planta. En el

tratamiento T1 las plantas que crecieron en ambos tipos de suelo resultaron tener un rendimiento muy similar.

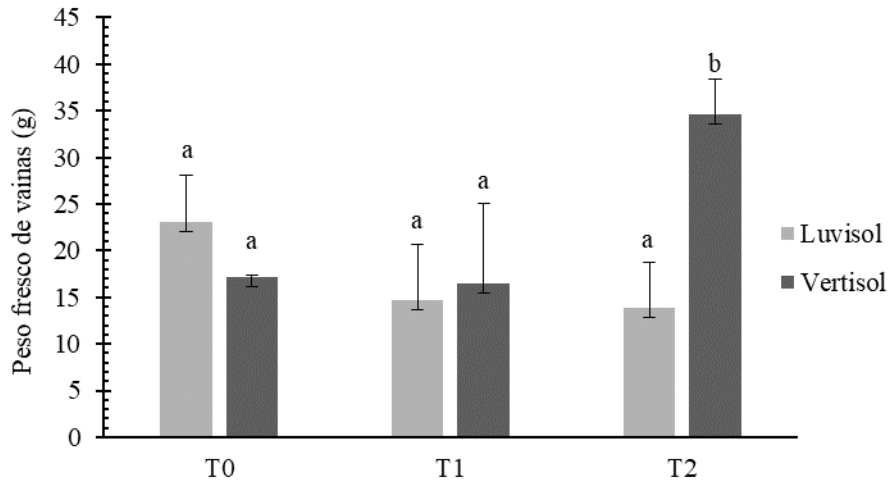


Figura 17. Peso fresco de vainas de frijol ejotero por cada tipo de suelo

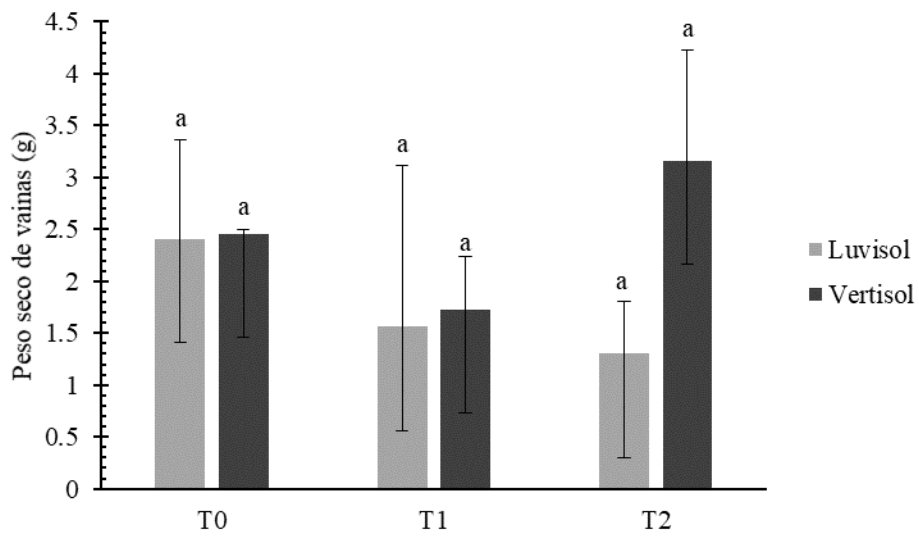


Figura 18. Peso seco de frijol ejotero por cada tipo de suelo

CAPITULO 4. CONCLUSIONES

Se logró determinar las características fisicoquímicas de ambos suelos, siendo el Luvisol aquel con más problemas de fertilización principalmente por su valor de CIC que fue bajo, dando como efecto una baja retención de cationes, por lo tanto, se recomienda la adición de MO para elevar su valor de 2% al 7%; el pH fue moderadamente ácido pero entra en el rango de valores en donde se desarrollan adecuadamente las plantas de frijol; la CE fue baja y por lo tanto con características de suelo no salino, con un efecto insignificante en el cultivo. El contenido de CC es alto. Con respecto al contenido nutricional; N, P, K, Fe, Cu, Zn, Mn se encontraron en rangos de valores de contenido alto; Ca y Mg con contenido medio.

El Vertisol resultó ser un suelo con contenido medio de MO, con pH medianamente alcalino, la CE de este suelo entra en la clase de no salino con un efecto insignificante en el cultivo. La CIC es alta, lo que implicó una buena disposición de cationes. La capacidad de campo de este suelo fue alta. Con respecto al contenido de nutrientes; el N se encontró en un alto de acuerdo con el contenido de N total, por lo que se requirió la incorporación de fertilizante con nitrógeno, el P se encontró en un nivel alto, K medio, y los valores de Ca, Mg, Fe, Cu Zn, Mn resultaron de contenido alto.

Se determinó la dosis de fertilización que requiere el cultivo de ejote de acuerdo con el estado nutricional del suelo Vertisol y Luvisol y la demanda interna del cultivo, sin embargo, no se logró el objetivo de alcanzar un rendimiento de 10 ton ha⁻¹ o 132 gr por planta en condiciones de invernadero, o cubierta plástica, empleando macetas de 4.5 L, en la FESC (Cuautitlán Izcalli, Estado de México) y en la temporada de otoño-invierno, ya que como se mencionó, surgieron variables que condicionaron el desarrollo óptimo del cultivo.

La dosis de fertilización calculada para Vertisol fue de 20-25-126 y para Luvisol 00-59-182 en N-P-K, se observó que el suelo Vertisol requería casi el doble de fertilización que el suelo Vertisol.

Para el tratamiento uno, T1: fertilización a partir de los cálculos de demanda del cultivo; en el peso fresco y seco no hubo diferencia estadística significativa.

Para el tratamiento 2, T2: 1.5 veces la dosis del Tratamiento 1; el peso fresco y seco de vainas en el suelo Vertisol resultó en un valor superior al doble que en el suelo Luvisol.

El rendimiento más alto obtenido en el suelo Vertisol correspondió al TV2, 34.5 g planta⁻¹ de peso fresco equivalente a 2.5 t ha⁻¹, mientras que el TV0 y TV1 fueron iguales con un promedio de 17 g planta⁻¹ equivaliendo a 1.2 t ha⁻¹.

Con respecto al Luvisol, el rendimiento para los tres tratamientos fue estadísticamente iguales con un promedio de 17 g planta⁻¹ equivalente a 1.3 t ha⁻¹ de peso fresco.

La fenología del cultivo se retrasó por 12 días y la última cosecha se realizó a los 118 días, esto se le atribuye a la estación del año en que se realizó el experimento. Se sugiere que para poder alcanzar un rendimiento mayor se cambie la fecha de siembra, se recomiendan siembras tempranas para obtener mayores rendimientos, ya que el inicio de la floración, madurez fisiológica, días de antesis y desarrollo de frutos, dependen en gran medida de la temperatura y horas luz. Así como mejorar las características de ambos suelos, específicamente con el Luvisol, se sugiere aumentar su CIC, incrementando a 25 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ con el fin de aumentar la disponibilidad de elementos nutritivos y características del suelo.

En ambos suelos se recomienda la adición de microorganismos benéficos que ayuden a mejorar las características del suelo y disponibilidad de elementos, ya que no es suficiente con utilizar fertilizantes minerales.

Puesto que se trata de generar recomendaciones de fertilización para el frijol ejotero en ambos suelos a partir del Método Sistémico Racional, se puede concluir que es necesario aumentar el número de muestras para poder obtener y observar el comportamiento del cultivo, personalmente considero que para generar una dosis de fertilización se requiere de realizar el plan de nutrición en diferentes épocas de año, y considerando más factores del ambiente donde se lleve a cabo, ya sea en macetas en invernadero o en campo, prefiriendo campo abierto para mejores ajustes a la realidad.

Es importante resaltar que el diagnóstico del estado nutricional de los suelos, es decir, la estimación de su capacidad para abastecer de nutrientes del suelo al cultivo es fundamental para alcanzar los rendimientos máximos posibles que un agroecosistema pueda producir y es

indispensable que se genere más información de los suelos, de manera más específica para los diferentes agroecosistemas.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculos para obtener cantidad de materia orgánica a añadir

Cantidad de materia orgánica a añadir

Datos:

CIC_i Luvisol: 7.6 cmol (+)/kg_s

CIC_f: 25 mol (+)/kg_s

Da Luvisol: 1.3 g/cm³

$$CIC \text{ final} - CIC \text{ inicial} = 25 - 7.6 = 17.4 \text{ cmol (+)/Kg}$$

$$y = \frac{17.4}{250} = \left(0.0696 \text{ g} \frac{MO}{\text{suelo}}\right) \times 100 = 7\% MO$$

$$\frac{7 \text{ g } MO}{100 \text{ g } s} \times \frac{100 \text{ g } s}{(0.1 \text{ kg } s)} \times \frac{1300 \text{ kg } s}{m^3} \times 0.20 \text{ m} \times \frac{10000 \text{ m}^2}{ha} \times \frac{1 \text{ kg } MO}{(1000 \text{ g } MO)} \times \frac{1 m^3}{950 \text{ Kg } MO} \times \frac{1 \text{ camión}}{6 m^3}$$

$$= 32 \text{ camiones de materia orgánica/ha}$$

Anexo 2. Datos para el cálculo de dosis fertilización

Datos para el cálculo de dosis de fertilización

Resultado de análisis de suelo, contenido de nutrientes

Nutriente	Unidad	Vertisol	Luvisol
N	%	0.0026	0.008
P	ppm	57	2
K	cmol ₍₊₎ /kg	0.9	0.5
Da	g/cm ³	1.2	1.3

Contenido nutrimental encontrados en tejidos (base peso seco) de ejote.

Cultivo	Rendimiento kg/ha	N	P	K	Ca	Mg	Fe	B	Cu	Zn	Mn
		%						ppm			
Ejote	10000	0.79	0.2	1.6	0.8	0.25	300	40	15	30	30

Fuente: Walsh & Beaton (1983)

Anexo 3. Cálculo de la dosis de fertilización para el suelo Vertisol

Vertisol

Demanda

Demanda para 10 t/ha

$$Kg N = \frac{0.786\% N \times 10,000 Kg}{100\%} = 78.6 Kg N$$

$$Kg P = \frac{0.2344\% P \times 10,000 Kg}{100\%} = 23.4 Kg P$$

$$Kg K = \frac{1.79\% K \times 10,000 Kg}{100\%} = 179 Kg K$$

Suministro

$$\frac{kgN}{ha} = \frac{0.0013kgN_{total}}{1kgs} \times \frac{0.02kgN}{1kgN_{total}} \times \frac{1,200kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} = \frac{62.4kgN}{ha}$$

$$\frac{kgP}{ha} = \frac{57mgP}{1kgs} \times \frac{1,200kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{1kgP}{10^6mgP} = \frac{13.68kgP}{ha}$$

$$\frac{kgK}{ha} = \frac{0.9cmol_{(+)}K^+}{kgs} \times \frac{1,200kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{39cgK}{1cmol_{(+)}K^+} \times \frac{1kgK^+}{10^5cgK^+}$$

$$= \frac{84.24kgK}{ha}$$

Dosis

Elemento	Demanda kg/ha	Suministro kg/ha	Eficiencia de fertilización	Requerimiento de fertilizante kg/ha	Requerimiento de fertilizante g/planta*
N	79	62.4	80	20.62	0.000275
P	20	13.7	25	25	0.000333
K	160	84.2	60	126	0.00168

*La dosis fue dividida entre la densidad de plantación (75,000 plantas/ha).

Anexo 4. Cálculo de la dosis de fertilización para el suelo Luvisol

Luvisol

Demanda

Demanda para 10 t/ha

$$Kg N = \frac{0.786\% N \times 10,000 Kg}{100\%} = 78.6 Kg N$$

$$Kg P = \frac{0.2344\% P \times 10,000 Kg}{100\%} = 23.44 Kg P$$

$$Kg K = \frac{1.79\% K \times 10,000 Kg}{100\%} = 179.865 Kg K$$

Suministro

$$\frac{kgN}{ha} = \frac{0.004kgNtotal}{1kgs} \times \frac{0.02 kg Ni}{1kg N total} \times \frac{1,300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} = \frac{208 kgN}{ha}$$

$$\frac{kgP}{ha} = \frac{2 mgP}{1 kgs} \times \frac{1300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{1kgP}{10^6mgP} = \frac{5.2kgP}{ha}$$

$$\frac{kgK}{ha} = \frac{0.5 cmol_{(+)}K^+}{kgs} \times \frac{1300 kgs}{m^3} \times \frac{2,000m^3}{ha} \times \frac{39cgK}{1cmol_{(+)}K^+} \times \frac{1kgK^+}{10^5cgK^+}$$

$$= \frac{50.7 kgK}{ha}$$

Dosis

Elemento	Demanda kg/ha	Suministro	Eficiencia de fertilización	Requerimiento de fertilizante kg/ha	Requerimiento de fertilizante* g/planta
N	79	208	80	-161.25	-
P	20	5.2	25	59.2	0.000789
K	160	50.7	60	182.5	0.00243

*La dosis fue dividida entre la densidad de plantación (75,000 plantas/ha).

Anexo 5. Resultado del análisis de suelo

Usuario: Laura Virginia Nuñez Balderas											
Lote: 2019-063		Reporte final:23-09-19									
Intervalo: 3057-3058											
No. Muestras: 2											
Costo: \$1,088.00											
Análisis de: suelo											
No.	Identificación	N kjeldahl	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
Lab.		(%	Bray	←	NH4OAc 1 N pH 7	→	←	DTPA		→	
		ppm			meq/100g (cmoles+Kg -1)			ppm			
3057	Vertisol Xhala	0.13	57	0.9	18.5	9.8	0.5	41	2.5	19.8	67
3058	Luvisol Chapa	0.40	2	0.5	5.8	2.1	0.1	36	0.8	1.2	67
datos en negrita= promedio de dos análisis											
Pbray, colorimetría azul de molibdeno											
Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn: Determinación por Absorción atómica											
K, Na: Determinación por Emisión atómica											
Ntotal, Método Kjeldahl. Digestión con H2SO4 conc., arrastre de vapor y destilación											

REFERENCIAS

- Acosta, G. J. A., y J. W. White. (1995). *Phenological plasticity as an adaptation by common bean to rainfed environments*. *Crop Sci.* 35:199-204.
- Aguirre, A. (1993). *Química de suelos salinos y sódicos*. UNAM, FESC. México.
- Aguirre-Gómez, A., y Núñez-Balderas, L. (2020). *Manual de prácticas de fertilidad y manejo de suelos*. UNAM-FESC-PIAPIME.
- Aguirre-Hernandez. (2009). *El manejo de la conductividad eléctrica en fertirriego, caso de estudio*. Centro de investigación en Química aplicada, Saltillo, México (pp. 20).
- Alonso-Báez, M. Gálvez-Marroquín, L. (2013). *Método racional de fertilización mineral de cultivos*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Desplegable Número 17.
- Arshad, M. A., Lowery, B., y Grossman, B. (1997). Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for assessing soil quality*, 49, 123-141.
- Atilio, C., y Reyes, C. (2008). *Programa de granos básicos, guía técnica para el manejo de variedades de frijol*. In Ministerio de agricultura y ganadería. El salvador. (pp. 4–22).
- Barbosa, R., y Overstreet, C. (2009). What is a soil electrical conductivity? LSU AgCenter. Pub 3185.
- Barrera, A., y Cabrera, J. (1995). *Paquete tecnológico para cultivar de frijol bajo condiciones de temporal en el estado de Morelos*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México.
- Barrios-Gómez, E. J., y López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35.
- Botto, J. F. (1998). *La germinación de las semillas por luz y su relación con la emergencia de plántulas de malezas* (Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- Campos-Escudero, A., Castillo-González, F., y Acosta Gallegos, J. (2002). Respuesta al fotoperiodo de familias segregantes de frijol de alto potencial de rendimiento. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25(1), 9–15.

- Chesworth, W. (Ed.). (2007). *Encyclopedia of soil science*. Springer Science y Business Media.
- Ciampitti, I. A., y García, F. O. (2008). Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. *Revista Horizonte*, 18, 22-28.
- Ciampitti, I. A., y García, F. O. (2007). *Requerimientos nutricionales Absorción y Extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios ii. hortalizas, Frutales y Forrajas*.
- CIMMYT. (2020). El nitrógeno en la agricultura. Consultado el 09 de enero de 2021 en: <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-nitrogeno-en-la-agricultura/>
- Coulombe, C. E., Dixon, J. B., y Wilding, L. P. (1996). Mineralogy and chemistry of Vertisols. In *Developments in Soil Science* (Vol. 24, pp. 115-200). Elsevier.
- Crouse, K., y Denny, G. (2015). *Soil pH and Fertilizers*. Mississippi State University Extension.
- Díaz-López, E., Escalante-Estrada, J. A. S., Rodríguez-González, M. T., y Gaytán-Acuña, A. (2010). Producción de frijol ejotero en función del tipo de espaldera. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 16(3), 215-221.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency-measurement and management. *Fertilizer best managment practices*, 1.
- Drechsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., y Wichelns, D. (2015). *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI).
- Driessen, P. M., Deckers, J., y Spaargaren, O. (2001). *Lecture notes on the major soils of the world*. (World Soil Resources Reports: FAO; Vol. 94). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Estrada, J. A. E., Escalante, L. E., y Rodríguez, M. T. (2001). Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades calor y radiación solar en clima cálido. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 309-315.
- Espinoza, L., Slaton, N., y Mozaffari, M. (2006). Agricultura y Recursos Naturales Como Interpretar los Resultados de los Análisis de Suelos. *Division of Agriculture Research and Extension, University of Arkansas System*. <http://www.uaex.edu>.
- Esquivel-Esquivel, G., Acosta-Gallegos, J. A., Rosales-Serna, R., Pérez-Herrera, P., Hernández-Casillas, J. M., Navarrete-Maya, R., y Muruaga-Martínez, J. S. (2006). Productividad y adaptación del frijol ejotero en el valle de México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 119-126.

- Eswaran, H., y Reich, P. F. (2005). World Soil Map. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 352–365. doi:10.1016/b0-12-348530-4/00019-9.
- Etchevers, J., Padilla, J. (2012). Diagnóstico de la fertilidad del suelo. (pp 250-270).
- Etchevers, J., Padilla, J., Moreno, C., y Tasistro, A. (2014). *Por qué hay confusión en la interpretación de los análisis químicos de suelo: Vol. I.*
- FAO. (2001). Lecture notes on the major soils of the world. World Soils Resources Reports. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2002). Los fertilizantes y su uso. Consultad el 3 de enero de 2020 en: <http://www.fertilizer.org>,
- FAO. (2006). World reference base for soil resources (WRB): a framework⁵² for international classification, correlation, and communication. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Consultado el 19 de abril de 2020 en: <https://www.isric.org/explore/wrb>.
- FAO. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. Agricultura para el Desarrollo. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. En: www.fao.org/publications
- FAO. (2018). Estadísticas sobre alimentación y agricultura. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Consultado el 12 de diciembre de 2019 en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Quinta ed.)*. México: Instituto de geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Serrano, P., Lucena, J., Ruano, S., y Nogales, M. (2010). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Madrid: *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Publicaciones*.
- Garduño-González, J., Morales-Rosales, E. J., Guadarrama-Valentín, S., y Escalante-Estrada, J. A. (2009). Biomasa y rendimiento de frijol con potencial ejotero en unicultivo y asociado con girasol. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15(1), 33-39.
- González, M. V. (2002). *Guía técnica del cultivo de ejote*. El salvador: CENTA.
- Guzmán, M., y López, J. (2004). *Ferti-riego: tecnologías y programación en agroplasticultura* : resultado de, curso de formación sobre practicultura y tecnología de riego, Bogotá, Colombia 2002, taller de Fertiirrigación. Colegio de Posgraduados Universidad Chapingo, México, 2004. Programa CYTED.

- Haller, V. V., Etchevers, J. D., Sanjuan Ramírez, A., y Palomino, T. S. (1998). Modelos de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *Terra Latinoamericana*, 16(1), 79–91.
- Havlin, J. L. (2005). *Fertility. Encyclopedia of Soils in the Environment*. North Carolina State University (p 10–19). <https://doi.org/10.1016/b0-12-348530-4/00228-9>.
- Horneck, D. A., Sullivan, D. M., Owen, J. S., y Hart, J. M. (2011). Soil Test Interpretation Guide. En: <http://extension.oregonstate>.
- ICAMEX. (2020). Producción de frijol en el estado de México. Obtenido de Instituto de Investigación y capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal en: <http://icamex.edomex.gob.mx/frijol>
- IDEA. (2007). Ahorro, Eficiencia Energética y fertilización nitrogenada. Madrid, España. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. pp 44.
- IFA. (2009). The Global “4R” Nutrient Stewardship Framework Developing Fertilizer Best Management Practices for Delivering Economic, Social and Environmental Benefits. *International Fertilizer Association*. Paris, France, 10pp.
- INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos, Serie II, escala 1:250 000 (Continuo Nacional). México.
- INIFAP. (2012). Muestreo de suelos y preparación de muestras. Desplegable Núm. 23, Centro de Investigación Regional del Noreste.
- IPNI. (2020). International Plant Nutrition Institute. Consultado el 20 de enero de 2020, Obtenido de <http://www.ipni.net/pnt>
- Johnston, A. M., y Bruulsema, T. W. (2014). 4R nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engineering*, 83, 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.029>
- Kisakye, J. (1989). Response of common bean cultivars to photoperiod, planting date, and maize density in intercrop. Thesis (M.Sc.).78p.
- Koutsika, M., y Traka, E. (2008). Snap Bean. In *Hand book of plant Breeding, Vegetables* : Vol. II (pp. 27–52).
- Kutílek, M., y Nielsen, D. R. (2015). Soil Is the Skin of the Planet Earth. In *Soil* (pp. 13-19). Springer, Dordrecht.
- Laii. (2005). Procedimiento para la toma de muestras de suelos, consultado el 28 de junio de 2020 en: http://www.laii.com.uy/htm_empresa/muestra_de_suelo.htm

- López, L., Betrán, J., Ramos, A., López, H., López, P., y Bermejo, J. (2005). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España.
- Mondragón, L. (2014). *Hortalizas manejo integral al alcance de todos*. ICAMEX. Secretaría de Desarrollo Agropecuario.
- Motsara, M. R., y Roy, R. N., (2008). *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ONU. (2019). Objetivos de desarrollo sostenible, Organización de las Naciones Unidas. Consultado el 19 de abril de 2020 en: <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>.
- Oryschak, M., Chrapko, D., Huggins-Rawlins, N., Jones, S., Korth, C., Kryzanowski, L., Neden, J., Doon Pauly, Tremblett, K., y Wallace, T. (2007). *Nutrient management. Planning Guide Forward Nutrient Management Planning Guide for Alberta*.
- Ramírez, A. J., Padilla, V. I., Rodríguez, C. F., y Salinas, P. R. (2017). *Manejo de virosis en frijol en el sur de Sonora*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.
- Rosales, S. R., Márquez, O. R., y Gallegos, A. J. (2001). Fenología y rendimiento del frijol en el altiplano de México y su respuesta al fotoperiodo. *Agrociencia*, 35(5), 513–523.
- Rosas, J. (2003). El cultivo de frijol común en América Tropical. Escuela Agrícola Panamericana.
- Sacan, M. (2018). Implementación de un plan de manejo agronómico orgánico del cultivo de ejote francés. Universidad Rafael Landívar, Venezuela.
- SADER. (2019). Entrada de Blog. Ejote: Inmaduro pero delicioso de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Consultado el 03 de marzo de 2020 en: <https://www.gob.mx/agricultura%7Ccolima/articulos/ejote-inmaduro-pero-delicioso-235430>.
- Salinas-Ramírez, N. Escalate-Estrada, A. Rodríguez-González, M., y Sosa-Montes, E. (2010). Phenology, yield, nutritional quality, and growth habit of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Annual report of the Bean improvement cooperative*. p.150–153.
- Salinas-Ramírez, N. Escalate-Estrada, A. Rodríguez-González, M., y Sosa-Montes, E. (2008). Rendimiento y calidad nutrimental de frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) en fechas de siembra. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3), 235-241.
- Salinas-Ramírez, N. Escalate-Estrada, A. Rodríguez-González, M., y Sosa-Montes, E. (2012). Rendimiento y calidad nutrimental de frijol ejotero en dos ambientes. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(4), 317-323.

- Savoy, H. (2012). *Fertilizers and their use*. Agricultural Extension Service, The University of Tennessee. (pp. 12-19).
- Segura-Pérez, M. L., Contreras-París, J. I. (2015). Las extracciones de nutrientes como guía para un manejo eficiente de la fertilización. Almería, España. Consejería de agricultura, pesca y desarrollo rural. (p. 1-11).
- SEMARNAT. (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial Mexicano.
- SEMARNAT. (2015). Los servicios ambientales del suelo Recuadro. In Informe de la situación del medio ambiente en México (pp. 153–190).
- Seminis. (2020). Ejote variedad Strike. Consultado el 6 de marzo de 2020 en: <https://www.latamseeds.mx/catalogo/ejote/ejote-strike>
- SMN. (2020). Normales climatológicas del estado de México, Cuautitlán Izcalli; Servicio meteorológico nacional. consultado el 11 de abril de 2020 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mex>
- SIAP. (2019). Producción agrícola de ejote, Servicio de Información Agrícola y Pecuaria. Consultado el 12 de diciembre de 2019 en: <http://infosiap.siap.gob.mx/>
- Suzuki, K., Takeda, H., Tsukaguchi, T., y Egawa, Y. (2001). *Ultrastructural study on degeneration of tapetum in anther of snap bean (Phaseolus vulgaris L.) under heat stress. Sexual Plant Reproduction*, 13(6), 293–299.
- Terron, P. U. (1992). *Tratado de fitotecnia general*. Mundi-Prensa Libros.
- USDA. (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo.
- Valero, S. G. (1994). *Interpretación de análisis de suelos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General de Estructuras Agrarias.
- Virgilio, M. (2003). Cultivo del ejote. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. El Salvador, (pp 18.)
- Walsh, L.M. and J. D. Beaton (Ed.) 1983. Soil Testing and Plant Analysis. 5° ed. Madison, USA, *Soil Science Society of America* (SSSA). 491 pág.
- World Reference Base for Soil Resources. (2007). Base de referencia mundial del recurso suelo. Roma: FAO.