



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Rasgos funcionales del frijol (*Phaseolus vulgaris*
L.) como indicadores potenciales de la calidad
de suelo en agroecosistemas de Guanajuato.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Guadalupe Vázquez Solís



DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Manuel Peña Ramírez

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx.,
Octubre, 2018.**



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.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos de la alumna

Vázquez

Solís

Guadalupe

55 38 77 83 12

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

309133333

2. Datos del Tutor

Dr.

Víctor Manuel

Peña

Ramírez

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Silke

Cram

Heydrich

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Julieta

Rosell

García

5. Datos del sinodal 3

Dra.

Mariana

Benítez

Keinrad

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Rodolfo Omar

Arellano

Aguilar

7. Datos del trabajo escrito

Rasgos funcionales del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) como indicadores potenciales de la calidad de suelo en agroecosistemas de Guanajuato.

91 p

2018

AGRADECIMIENTOS

En esta etapa de mi vida han sido varias las instituciones y personas que han contribuido con grandes pasos. Cada una forma parte importante del camino en mi formación profesional y personal, por ello hago un espacio para agradecer a todos y dedicarles este gran logro para mí...

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por convertirse en mi segunda casa, por darme la dicha de pertenecer a esta gran comunidad, por las oportunidades dadas durante mi vida de estudiante, por la formación profesional adquirida, el aprendizaje personal y las experiencias vividas que me han permitido moldear mi ser. Estoy orgullosa de pertenecer a una de las mejores universidades de México.

A la Facultad de Ciencias, por alojarme en sus espacios, en donde adquirí muchos de los conocimientos que me permitieron llegar hasta aquí, en lo profesional y lo personal viví grandes experiencias que dejaron en mí recuerdos y grandes conocimientos.

A mis profesores, gracias por transmitir y compartir su conocimiento, por la paciencia, por orientarme, por la ayuda en todo, por ser, en muchas ocasiones, un gran ejemplo para mí. Sin duda son personas que contribuyeron en gran parte en esta etapa, cada clase, cada práctica, cada enseñanza son las que permitieron que mi mente se fuera ampliando y fuera eligiendo el camino por el cual andar.

Al Instituto de Ecología por darme la oportunidad de formar parte de su comunidad, por permitirme seguir aprendiendo en sus laboratorios, por incluirme en las actividades que ofrece y darme un panorama amplio del trabajo que se hace en los institutos.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, LANCIS, porque fue donde pase gran parte del proceso de este trabajo, en sus espacios pasamos horas trabajando con las muestras, analizando, escribiendo, pensando... se convirtió en un refugio para mí. Gracias también porque ahí aprendí muchas cosas, conocí a diversos personajes que ampliaron mi forma de ver la ciencia, influyeron en mi camino y de alguna forma cambiaron mi vida.

Al proyecto CONACyT con número 247672 "Biodiversidad y Ecología Funcional de suelos, conservación y resiliencia de sistemas naturales, agroecológicos y agroforestales" a cargo de la Dra. Mariana Benítez Keinrad, por el financiamiento y apoyo dado durante mi participación y durante la realización de este trabajo que forma parte de dicho proyecto.

A todas las personas que participaron en el proyecto de CONACyT antes mencionado, que, con su trabajo, ayuda y dedicación, hicieron posible que este trabajo y el proyecto en general continuara por un buen camino. En especial gracias al personal técnico de este proyecto quienes apoyaron en la logística y organización del trabajo en campo, Rodrigo González Chauvet, Adriana Uscanga Castillo y Denise Arroyo Lambaer, y por su valiosa ayuda en todo.

A los estudiantes que participaron en el gran proyecto de CONACyT, Fabiola Estrada Salinas, Diana Karen Ysimoto Monroy, Yolotli A. Narváez Carreño, Blanca E. Hernández Hernández, Valeria Vázquez Barrios y Víctor M. Piña Tejeda, quienes apoyaron en el trabajo de campo, en la obtención y procesamiento de las muestras, gracias por hacernos compañía y ayudarnos en intensos días de trabajo.

A los agricultores de Guarapo y la Quemada en Guanajuato, comunidades en donde se realizó el trabajo de campo, gracias por permitirnos entrar a sus parcelas, abrirnos las puertas de sus casas, compartir sus alimentos, sus conocimientos, su experiencia. Gracias por su amabilidad, hospitalidad y cálido recibimiento cada que íbamos a visitarlos, por facilitar en gran medida la realización de este y otros trabajos, sin duda cada uno de los productores, su familia y personas locales que participaron, son parte importante del proyecto.

Al Laboratorio de Biogeoquímica Terrestre y Clima (Instituto de Ecología, UNAM) a cargo de Dr. Julio Campo Alves y el M. en C. Enrique Solís Villalpando, y a la Dra. Thalita Abbruzzini por la realización de análisis edáficos y por compartir la valiosa información a los miembros del proyecto.

Al Laboratorio de Edafología Ambiental (Instituto de Geología, UNAM) a cargo de la M. en C. Kumiko Shimada Miyasaka, por permitir realizar varios de las mediciones y análisis de suelo en su espacio, con ayuda de su equipo y por supuesto del personal, sin duda son parte importante del proyecto.

Al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental (LABFER, Colegio de Postgraduados) a cargo de la M. en C. Juliana Padilla Cuevas, por llevar a cabo la estimación de variables químicas del suelo y plantas. Gracias por facilitar el trabajo y ser de gran ayuda en este proceso.

A la Dra. Mariana Benítez Keinrad, gracias por permitirme formar parte del proyecto del que está cargo, por la confianza, por la ayuda para que el trabajo saliera bien y se llevara a cabo de manera adecuada, por la asesoría, por el apoyo en todo momento, ya fuera como parte de este proceso o en otras ocasiones. Gracias también por sus atinadas observaciones, comentarios y correcciones a este trabajo y por su disponibilidad para revisarlo.

A la Dra. Silke Cram Heydrich, por su amable disposición, por sus correcciones, observaciones y consejos para mejorar este trabajo. Tuve la fortuna de ser su alumna y le agradezco que haya compartido su conocimiento, aprendí bastante en su curso, y fue de las primeras veces que interactúe directamente con los agricultores y su trabajo, sin duda eso influyo en gran medida en la dirección que va tomando mi camino.

Al Dr. Omar Arellano Aguilar, gracias por su disponibilidad para formar parte del jurado, por revisar el trabajo y dar sus observaciones, comentarios, sugerencias y correcciones que sin duda mejoraron el escrito y la investigación. También tuve la dicha de ser su alumna en algunas materias y agradezco el conocimiento que compartió con nosotros, por asesorarnos en cualquier tema y aconsejarnos, mucho de lo aprendido con usted amplió mi forma de ver las cosas dentro de la ciencia y la forma en que podemos aplicarla.

Al Dr. Víctor Peña, gracias por asesorarme, por compartir su gran conocimiento, por ayudarme a mejorar mi entendimiento sobre el suelo y de muchas cosas, por la ayuda en campo y en todo momento. Por guiar y llevar a cabo el análisis de las muestras de suelo tanto en campo como en laboratorio, por compartir la información que es de gran importancia para el proyecto. Gracias por aconsejarme, por guiarme durante el proceso de la tesis, y gracias sobre todo por la paciencia.

A la Dra. Julieta Rosell, gracias por tanto. Gracias por la asesoría en todo momento, por el conocimiento compartido, por dejarme participar en diversos proyectos, por las oportunidades de financiamiento dadas, por darte siempre un tiempo para atender así fuera una duda pequeña, por abrir las puertas de tu cubículo y dejar que se convirtiera en un espacio de trabajo para nosotros. Gracias por acompañarnos a campo, por trabajar con nosotros, por siempre tener palabras de aliento cuando ya estábamos muy cansadas, gracias por hacer de las salidas al campo algo divertido y muy enriquecedor. Gracias por darte tiempo para analizar los datos conmigo, por tus incontables revisiones al trabajo escrito, por tus correcciones, sugerencias y enseñanzas, sin tu ayuda este trabajo no sería lo que ahora es. Gracias por ser una guía en mi vida profesional y personal, por tu ayuda en todo, por preocuparte por mí, por estar siempre pendiente, por tratar de que siempre estuviéramos bien y a gusto con lo que hacemos, gracias por la confianza dada en todo momento. Eres una gran persona y una gran investigadora, estoy muy contenta y orgullosa de formar parte de tu grupo de trabajo, sin ti nada de esto hubiera sido posible y tal vez seguiría algo perdida en el mundo de la ciencia...

A la M. en C. Fabiola Estrada Salinas, gracias por todo, por recibirme con los brazos abiertos, por estar siempre, por ayudarme en campo y hacerme compañía, por explicarme lo que no entendía, por asesorarme, por aconsejarme, por el conocimiento compartido... de ti he aprendido mucho y todo lo que se hizo en este trabajo, sin duda, no hubiera sido posible sin ti. Gracias por acompañarme en campo, en el laboratorio, en jornadas duras de trabajo, hasta altas horas de la noche. Gracias por las risas, las pláticas, gracias sobre todo por tu invaluable amistad, porque has sido un gran ejemplo para mí y una gran amiga.

A los compañeros y amigos del Lancis, Cipa, Karen, Paula, Fabi, Sandra, cada una aportó muchas ideas y cosas nuevas en mí, me alegra haberlas encontrado en este camino. Gracias por el conocimiento, las pláticas, los chistes, los consejos, las risas compartidas y su compañía, sin duda mi estancia en el laboratorio no hubiera sido la misma sin ustedes.

A mis compañeros y amigos de la carrera, Juan, Sonia, Vicky, gracias por hacer más ligero este camino, por los tantos momentos y experiencias vividas, por las prácticas de campo inolvidables, por formar recuerdos dentro y fuera de lo académico que seguramente quedarán por siempre.

Dedicatoria

A la vida y a Dios, gracias por tantos momentos, por darme la oportunidad de formar mi camino y permitir que siga avanzando. Gracias por las cosas bellas que me han permitido vivir, por la extraordinaria familia de la que formo parte, por los amigos brindados, por el lugar en el que me toco habitar, por todo. Gracias por la vida misma...

A toda la gran familia, gracias por creer en mí, por ser pacientes y apoyarme en todo. Gracias por estar ahí siempre que los necesito, por confiar en mí. Gracias a mis abuelitos, a todos los tíos y todos los primos, por estar con nosotros siempre y por los gratos momentos compartidos.

A mi papá †, sé que estarías orgulloso de todos, este logro también va para ti hasta donde estés... Gracias porque has sido inspiración para mí, por ser un grato recuerdo, gracias por estar en esencia a mi lado siempre...

A mi mami, gracias por el apoyo en todo, por tus consejos, tus palabras, tu paciencia, por estar ahí siempre para mí, por tus desvelos a mi lado, por dedicarnos tu vida entera. Gracias porque siempre has sabido cómo hacer las cosas, por guiarme en el camino de la vida. Gracias por siempre estar conmigo, por tu amor, por ser un gran ejemplo para mí, mi inspiración en mucho, por ser la mejor mamá del mundo, sin ti nada de esto sería posible, por eso te dedico este gran paso y todo lo que soy. Te quiero a montones...

A mis hermanos, gracias por su apoyo, por su paciencia y por estar siempre cuando los necesito. Magali, gracias por cuidarme desde chica, por estar con nosotros. Sin tus regaños, consejos, tu cuidado y paciencia no habiéramos llegado aquí.

Omar, gracias por estar siempre, por apoyarme en mucho, por la paciencia, la ayuda en todo, por hacerme reír siempre, por ser mi compañero en muchos momentos. Gracias a los dos por acompañarme durante todo el camino y ser los mejores hermanos del mundo, y a los que quiero un montón.

A mis sobrinos, Anaid y Moy, gracias por aguantarme, por compartir su felicidad, por sus juegos y risas que me hacen pasar momentos felices.

A Cucho y Tomasa, gracias por su cariño, por su compañía a todas horas, por distraerme, por hacerme pasar buenos ratos, por la felicidad que me dan, sin ustedes la vida no sería igual...

A un gran y buen amigo, gracias por tu compañía, por tu paciencia, por preocuparte por mí. Gracias por las pláticas, la confianza, por tu valiosa amistad y tiempo brindado. Gracias Mauricio por estar para mí siempre, a pesar de la distancia que al final nos une, gracias por formar parte de mi camino y convertirme en una persona especial para mí...

Gracias a todos, los quiero demasiado, son parte imprescindible de todo lo que he logrado hasta ahora y por supuesto de mi vida, este gran logro se los dedico con todo mi cariño...

Mira profundamente en la naturaleza y entonces entenderás todo mejor
Albert Einstein

La vida debe ser un continuo aprendizaje
Gustave Flaubert

Índice

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	2
❖ Los agroecosistemas y la crisis de producción de alimentos.....	2
❖ El suelo como recurso vital	4
❖ Indicadores de calidad de suelo: una herramienta para el monitoreo del suelo.....	8
❖ Rasgos funcionales en plantas: una aproximación como indicadores	9
❖ Frijol: un cultivo de importancia nacional	15
III. OBJETIVOS	16
Objetivo general.....	16
Objetivos particulares	16
IV. HIPÓTESIS	17
V. MATERIALES Y MÉTODOS	19
▪ Sitio de estudio.....	19
La Quemada	19
Guarapo.....	21
▪ Selección de parcelas	22
▪ Muestreo de suelos	23
i) Textura	24
ii) pH	25
iii) Conductividad eléctrica.....	25
iv) Densidad aparente (D.A.).....	25
v) Capacidad Máxima de Retención de Agua (CMRA)	26
vi) Nitrógeno (N)	26
vii) Fósforo (P).....	27
viii) Carbono orgánico total (C).....	27
▪ Transformación de las variables edáficas para correlacionarlas con rasgos funcionales de plantas	27
▪ Selección de individuos y medición de rasgos funcionales en la planta de frijol.....	27
i) Rasgos funcionales de hojas.....	28

ii) Rasgos funcionales de tallo	30
iii) Rasgos funcionales de raíces	31
▪ Productividad en parcelas de frijol	34
▪ Análisis estadístico.....	35
VI. RESULTADOS	36
i) Variables edáficas en las parcelas de frijol.....	36
ii) Relación entre variables de suelo y rasgos funcionales de la planta de frijol.....	41
iii) Variables de productividad en las parcelas de frijol	50
iv) Relación de variables de suelo y variables de productividad en cultivos de frijol	52
VII. DISCUSIÓN	55
i) Características físicas y químicas de los suelos de las dos localidades estudiadas.....	56
ii) Comportamiento de los rasgos funcionales de las plantas.....	61
iii) Productividad de los cultivos de frijol	62
iv) Influencia de las variables edáficas en la productividad de los cultivos de frijol.....	63
VIII. CONCLUSIÓN	64
IX. RECOMENDACIONES	65
X. REFERENCIAS	67
ANEXO 1	76
ANEXO 2	80

I. RESUMEN

La degradación del suelo es un proceso de gran importancia a nivel mundial. Cerca de 33% los suelos tienen algún grado de degradación a nivel mundial (FAO, 2015), y en México se estima que cerca del 45% presenta dicha situación. Gran parte de la degradación en los agroecosistemas se debe a la implementación de prácticas de manejo inadecuadas, lo que agrava el estado del suelo y del sistema agrícola en general, afectando a su vez a los agricultores y personas que dependen de esta importante actividad económica. La creación de herramientas que permitan monitorear los suelos agrícolas es un tema de gran relevancia para la conservación del recurso. Estas herramientas deben integrarse tomando en cuenta diversos factores que conforman a los agroecosistemas, como las plantas, suelo, e incluso a la sociedad. En este proyecto se tomaron en cuenta tanto las características de las plantas de cultivo como las variables de los suelos de las parcelas, así como la interacción existente entre ambas variables, con el objetivo de detectar y proponer posibles indicadores biológicos de la calidad del suelo derivados de las características de las plantas.

Para conocer la relación existente entre la calidad del suelo y los rasgos funcionales de la planta de frijol se realizaron correlaciones pareadas. Esto permite conocer cómo las plantas están respondiendo a las condiciones del suelo de la parcela, reflejando así las estrategias de adquisición y procesamiento de recursos del ambiente (Reich, 2014). A su vez, esto permitió determinar aquellas características de la planta que, al tener una relación más estrecha con variables edáficas, puedan ser propuestas como indicadores potenciales de la calidad del suelo. Los rasgos funcionales foliares con fuerte asociación a algunas variables de calidad del suelo fueron el grosor de la lámina, la concentración de fósforo y el área foliar específica. En cuanto a rasgos funcionales radicales sobresalieron la concentración de fósforo, el diámetro de la raíz principal, la biomasa total y la densidad del tejido radical de las plantas de frijol. Sin embargo, para que dichas características pudieran ser propuestas como indicadores es necesario que cumplan con ciertas condiciones, entre las que destacan la medición y visualización sencilla y accesibilidad para los productores, quienes están en contacto directo con los sistemas agrícolas. Entre los rasgos funcionales mencionados, los que cumplen con estas características para ser propuestos como indicadores de calidad del suelo son el grosor y área foliar, así como el diámetro de la raíz principal, todos rasgos de fácil implementación en campo.

La generación de indicadores de calidad del suelo contribuye a la conservación y mejoramiento de diversos elementos de los agroecosistemas. Las características de la planta propuestas para que los agricultores locales puedan monitorear la calidad del suelo y con ello el estado de su parcela, permiten guiar a una mejor toma de decisiones para el manejo de sus agroecosistemas, promoviendo así la conservación del suelo, la optimización del desarrollo de las plantas y de los cultivos, contribuyendo a su vez en las condiciones de productividad y con ello en la calidad de vida de los agricultores locales.

II. INTRODUCCIÓN

La crisis por degradación del suelo es un problema que va en aumento, poniendo en riesgo la existencia de organismos para los que el suelo representa un recurso vital y la provisión de importantes servicios ecosistémicos, como la producción de alimentos. A nivel mundial, cerca del 33% del suelo cuenta con cierto grado de degradación (FAO, 2015a), y en México se estima que el 45% presenta esta situación (SEMARNAT y CP, 2003) debido, en gran medida, al impacto antropogénico. A pesar de que la degradación de este recurso puede darse por distintas razones, las prácticas agrícolas inadecuadas son una de las principales causas de alteración de las propiedades del suelo y de la disminución de su calidad (Burbano-Orjuela, 2016). Esta degradación puede llevar a la agudización de la crisis alimentaria a nivel global, pues se estima que el 95% de los alimentos se producen, directa o indirectamente en el suelo (FAO, 2015b). Debido a esta situación, la evaluación de las condiciones del suelo resulta fundamental para determinar las prácticas que conlleven a un manejo sostenible a largo plazo.

Generalmente se han empleado diversas propiedades físicas, químicas y biológicas como indicadores de la calidad del suelo. Aunque existen numerosas propuestas para estimadores de fácil implementación en el campo, los indicadores biológicos y particularmente los relacionados con rasgos funcionales de las plantas siguen siendo limitados en número pues no se les ha considerado como indicadores de calidad del suelo como tal, a pesar de que se ha encontrado que tienen un gran poder para reflejar las condiciones del suelo. Esta investigación aporta a la búsqueda de estos indicadores biológicos a partir de las características de las plantas. De esta forma este trabajo atiende a cuestiones de degradación, monitoreo y manejo del suelo con el propósito de minimizar la degradación de tan valioso recurso.

En esta investigación se examinan las características de las plantas relacionadas con las propiedades físicas y químicas del suelo, con el fin de generar indicadores biológicos de la calidad del suelo en los agroecosistemas. Como sistema, se eligió al frijol, uno de los cultivos más relevantes a nivel nacional por su importancia cultural, alimenticia y económica. Mediante el muestreo de nueve parcelas en dos zonas contrastantes del estado de Guanajuato, uno de los principales centros de producción de este cultivo, se examinaron las características edáficas y su relación con las características de las plantas. Este trabajo es pionero a nivel internacional en realizar una propuesta de indicadores de calidad de suelo a partir de características funcionales de las plantas. Estas características son un punto de partida muy importante para seleccionar a aquellas que permitan a los productores de frijol evaluar y monitorear de manera sencilla y eficaz la condición del suelo de sus parcelas y tomar sus decisiones de manejo.

❖ Los agroecosistemas y la crisis de producción de alimentos

La agricultura es una de las actividades productivas más importantes a nivel mundial y, específicamente, en México. Esta actividad impulsa la economía de la mayoría de los países en desarrollo, y cerca del 42% de la humanidad depende de ella para su subsistencia (FAO, 2005). En México, la agricultura resalta por ser un sector de gran importancia, cerca de 30 millones de hectáreas son destinadas a tierras de cultivo, lo que representa aproximadamente el 15% del

territorio nacional (198 millones de ha). La agricultura aporta al Producto Interno Bruto (PIB) nacional cerca de 3.7% (INEGI, 2014), además, proporciona empleo al 13% de la población (3.3 millones de agricultores y 4.6 millones de trabajadores asalariados y familiares no remunerados). Es importante destacar que aproximadamente 24% de la población total nacional vive en el medio rural, en el que la agricultura representa cerca del 42% del ingreso familiar (McMahon y Valdés, 2011). Desde su inicio hace diez mil años, la agricultura llevó a la modificación de los ecosistemas naturales en agroecosistemas.

Los agroecosistemas son creados para satisfacer diversas necesidades humanas, entre las que destaca la alimentación, por lo que poseen un importante componente social. En los agroecosistemas se modifican y alteran gran parte de los procesos naturales, elementos bióticos y abióticos que lo conforman para obtener principalmente alimentos y materias primas. La estabilidad de los agroecosistemas se basa, en gran medida, en la diversidad que poseen constituida por el paisaje agrario y flujos (materia, organismos, energía) interaccionando entre ellos, y con el uso local de la comunidad rural (Sans, 2007). Por ello, el entendimiento de estos sistemas conlleva una visión integral en la que se toma en cuenta a todos los elementos. Esta visión promueve una gestión sostenible de los agroecosistemas mediante prácticas de manejo que mejoren y aumenten la fertilidad y la calidad de las producciones. No obstante, históricamente y, en gran medida por presiones demográficas, la agricultura ha atravesado por diversos procesos de innovación e intensificación, incluyendo la Revolución Verde.

La Revolución Verde representó un cambio radical en la manera de producir alimentos a nivel mundial. A partir de los años sesenta dio comienzo la simplificación de los sistemas agrícolas, la mecanización para la preparación de la tierra, la dependencia de aportes externos (Altieri, 1999), la modificación de semillas de siembra, y el uso extensivo de plaguicidas y fertilizantes. Todo esto se realizó con la finalidad de elevar la productividad agrícola, basándose en una producción extensiva a gran escala y el uso de alta tecnología, y con el objetivo de disminuir los precios, sobre todo en zonas con escasos recursos, evitando así crisis alimentarias. No obstante, esto ha traído diversas consecuencias económicas, sociales y ambientales, entre las que se pueden mencionar los altos costos de producción, el efecto de la competitividad internacional sobre la agricultura a pequeña escala o familiar y el aumento de la pobreza rural (Segrelles, 2001). Asimismo, en cuanto a externalidades ambientales negativas destacan el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas a la atmósfera, suelo y biota (Sarandón y Flores, 2016), así como las afectaciones de los agroquímicos a la salud de los agricultores y de la gente que reside cerca de zonas agrícolas (Montoro, et al., 2009).

Un recurso importante y directamente afectado por las prácticas resultantes de la Revolución Verde es el suelo. El suelo ha disminuido su complejidad física y biológica en los agroecosistemas, degradándose, erosionándose y exigiendo técnicas basadas en insumos externos cada vez más caras, por lo que resalta el entendimiento del suelo como sistema, como recurso y como un elemento base de los sistemas agrícolas que interactúa, entre otros factores, con las plantas de cultivo. Esto conlleva integrar aspectos edafológicos, biológicos, ecológicos de los agroecosistemas con la finalidad de generar adecuadas prácticas de manejo y con ello la conservación del suelo,

promoviendo el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que brinda, entre ellos la seguridad alimentaria.

❖ **El suelo como recurso vital**

El suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre y, al igual que el aire y el agua, es uno de los recursos indispensables en la vida del planeta, sosteniendo una gran diversidad de organismos y cubriendo un papel importante dentro de los ecosistemas. El suelo es definido por la FAO (2018) como un cuerpo natural que consiste en capas, llamadas horizontes, compuestas de materiales minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es producto de la interacción compleja de factores formadores del suelo como la materia orgánica (organismos presentes que influyen en propiedades físicas y químicas del suelo), el relieve (influye en la tasa de desarrollo del suelo), el tiempo (la duración de los procesos edáficos influye en la naturaleza del suelo), el clima (la temperatura y precipitación), y el material parental (materia mineral meteorizada) (Tarbuck y Lutgens, 2005). En conjunto, los factores de formación actúan generando una gran diversidad de tipos de suelos con diversas propiedades (Cuadro 1). A su vez, el suelo es considerado como un sistema y un recurso debido a su dinamismo por la interacción entre sus fases líquida, sólida y gaseosa (Moreno, et al., 2000), mismo que le posibilita brindar servicios ambientales de gran relevancia.

La importancia del suelo en los ecosistemas recae, en gran medida, en los múltiples servicios ecosistémicos que este recurso provee. En el suelo ocurren diversos procesos físicos, químicos y biológicos. El suelo es un importante reservorio de agua y depurador de ésta durante la infiltración, y un mediador de los ciclos biogeoquímicos de elementos como carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros. Asimismo, es soporte para la urbanización, depósito del patrimonio geológico y arqueológico, soporte y sustento de seres vivos, a los que suministra agua y nutrientes esenciales. En específico, el desarrollo de las plantas depende directamente de las condiciones del suelo, las prácticas de manejo que se apliquen, la capacidad de retención de agua, su densidad aparente, estructura, de la profundidad fisiológica del suelo, la presencia de nutrientes y sustancias tóxicas, así como de la capacidad de aireación. Estas condiciones están a su vez condicionadas por el tipo de suelo y sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Burbano-Orjuela, 2016). Estas propiedades edáficas determinan en gran medida la fertilidad del suelo y la productividad de las plantas, siendo determinantes para uno de los servicios ecosistémicos más conocidos y relevantes a nivel mundial, la producción de alimentos (Burbano-Orjuela, 2016).

Cuadro 1. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Se muestra la descripción de la variable, su relación con funciones del suelo y su estimación.

Naturaleza	Propiedad del suelo	Descripción	Relación con la función del suelo	Estimación	Referencia
Físicas	Textura	Se refiere a la composición mecánica del suelo, es decir, a la distribución de los tamaños de las partículas que lo constituyen (arcillas, limo, arenas).	Provee información sobre la retención y transporte de agua y compuestos químicos, así como de la erosión del suelo.	Se puede estimar por la “prueba al tacto”, aunque esta prueba es subjetiva. Un dato más exacto se obtiene por la técnica de Bouyoucos. Se expresa en porcentaje de cada tamaño de partícula.	Siebe, et al., 2006
	Densidad aparente	Indica la compactación del suelo. El volumen del suelo se considera incluyendo el volumen de las partículas de suelo y el volumen de los poros entre las partículas. La densidad aparente depende de la textura del suelo, la densidad de los minerales del suelo y de las partículas de materia orgánica, así como del empaquetamiento de las partículas.	Se relaciona con el nivel de compactación del suelo, la penetrabilidad de las raíces, la porosidad, infiltración, y la capacidad de sostener vegetación.	Se calcula dividiendo el peso seco de una porción de suelo dado, dividido entre su volumen. Se expresa en g/cm ³ .	Siebe, et al., 2006
	Capacidad de retención de agua	Estima la cantidad de agua que contendrá un suelo a su capacidad de campo, teniendo en cuenta las condiciones de drenaje, que influyen en el retardo de la evacuación del agua gravitacional que ocupan los macroporos del suelo.	Relación con almacenamiento y transporte de agua, erosión, humedad aprovechable; limita el crecimiento de plantas y su productividad.	Para su determinación, el suelo es saturado y filtrado, dejándolo escurrir por un tiempo para después medir el peso húmedo; se expresa en L/m ² .	Domingo, et al., 2006
	Conductividad eléctrica	Es la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica y determina la concentración de sales solubles en el suelo.	Influye en el crecimiento de plantas y su desarrollo, ya que altas concentraciones de sales son tóxicas para las plantas.	Se estima por medio de un conductímetro, y se expresa en dS/m.	Barbaro, et al., 2014
	pH	Indica el grado de acidez o alcalinidad del suelo.	Influye en reacciones químicas que determinan disponibilidad de nutrientes para su absorción.	Se determina por medio de un potenciómetro.	Barbaro, et al., 2014

Continuación Cuadro 1. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Se muestra la descripción de la variable, su relación con funciones del suelo y su estimación.

Naturaleza	Propiedad del suelo	Descripción	Relación con la función del suelo	Estimación	Referencia
Químicas	Nitrógeno total	El nitrógeno es capturado del aire por el suelo, para convertirlo en formas disponibles para los organismos por medio de procesos metabólicos de plantas y bacterias.	Afecta al crecimiento de las plantas. Influye en el área foliar, intercambio de gases, tamaño de la raíz y sus funciones.	Se determina por medio del método de combustión en un analizador de C/N; se expresa en porcentaje o kg/m ² .	Guo, et al., 2002.
	Fósforo total	Este elemento es utilizado para mantener la energía utilizada en las actividades metabólicas.	Influye en el crecimiento de las plantas y su productividad, sobre todo en el desarrollo y arquitectura del sistema radical.	Es común que se determine por medio del método de Bray y Kurtz, u Olsen dependiendo del pH; se expresa en ppm, porcentaje o g/m ² .	Margaret, et al., 2014
	Carbono total	Es un componente importante del ciclo global del carbono. El suelo puede actuar como fuente o reservorio de este elemento.	Afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su calidad, sostenibilidad y capacidad productiva.	Se estima por medio de un analizador determinador automático de carbono. Se expresa en kg/m ² o porcentaje.	Martínez, et al., 2008.
Biológicas	Lombrices	Las lombrices de tierra digieren materiales del suelo; durante el paso por su sistema digestivo, la tierra es enriquecida con nutrientes (N, P, K, Ca) y microorganismos.	Aportan nutrientes al suelo; mejoran la porosidad y el desarrollo radical.	Se contabiliza el número total de lombrices de tierra por unidad de área. Es expresada en número de lombrices/m ² .	USDA, 2009a
	Enzimas del suelo	Las enzimas son específicas de un sustrato y se unen a él por sitios activos formando un complejo temporal. Las fuentes de enzimas son los microbios muertos, raíces, residuos y animales del suelo.	Incrementan la velocidad de reacción de la descomposición de residuos vegetales y liberan nutrientes disponibles para las plantas.	Son medidas indirectamente a través de su actividad con ensayos bioquímicos.	USDA, 2010
	Respiración del suelo	Es una medida de la actividad biológica y la descomposición.	Durante el proceso los nutrientes se convierten a formas disponibles para las plantas.	Es medida por métodos especializados y estandarizados de acuerdo con la USDA.	USDA, 2009b

El suelo cubre una de las necesidades más básicas de los seres humanos, que es la alimentación. Se estima que el 95% de los alimentos se producen, directa o indirectamente, en el suelo. Más del 35% de la superficie terrestre se destina a la agricultura (FAO, 2015b). La producción agrícola depende en gran parte de las necesidades edáficas óptimas para el desarrollo y productividad de las plantas de cultivo, así como del manejo implementado en los agroecosistemas. La intensificación de la agricultura mediante el uso de tecnologías e innovaciones como la maquinaria y los agroquímicos han permitido un aumento en el rendimiento de ciertos cultivos, pero también han alterado los procesos naturales del suelo, causando salinización, compactación, acidificación, disminución de la materia orgánica y alterando su estructura. Todos estos cambios disminuyen la calidad del suelo, es decir, su capacidad para cumplir sus funciones dentro del agroecosistema, incluyendo la productividad vegetal y animal, el mantenimiento o mejoramiento de la calidad del agua y del aire, y la provisión de salud y habitación humana (Laishram, et al., 2012). La pérdida de la calidad del suelo y su consecuente degradación afectan el equilibrio de los servicios ecosistémicos que el suelo nos brinda, lo que atrae diversas problemáticas ambientales, sociales y económicas.

La degradación es uno de los problemas que mayormente afecta al suelo a nivel mundial. La degradación es el cambio en la condición y propiedades del suelo a niveles inferiores a los originales, por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos causados por un uso inapropiado o un manejo deficiente (NSW, 2017; FAO, 2015). Se han planteado tres etapas para describir la degradación del suelo. En la primera se destruyen paulatinamente las características originales del suelo, sin que el agricultor perciba dicho cambio pues la erosión es lenta y el rendimiento de los cultivos no disminuye. Posteriormente se alcanzan valores bajos de materia orgánica, ocasionando la pérdida de estructura del suelo y la compactación de la superficie, lo que impide la infiltración del agua y el desarrollo radical de las plantas, aspecto difícil de recuperar con la aplicación de fertilizantes. Finalmente, en una tercera etapa, la erosión es tan drástica que el agricultor prefiere abandonar las tierras debido a la baja productividad, y a que el manejo de las parcelas se vuelve complicado (Lal, 2001). Este problema es provocado usualmente por un mal manejo de la agricultura, la industria o por efectos urbanos, aunque se da de diferente forma de acuerdo con la intensidad de las prácticas inadecuadas, de la pendiente, la textura, la estructura y la resistencia a la erosión por parte del suelo. De acuerdo con la FAO (2015), a nivel mundial cerca del 33% del suelo se encuentra de moderada a altamente degradado. En México, de acuerdo con la Evaluación de la Degradación del Suelo por el Hombre (SEMARNAT y CP, 2003), se estima que el 44.9% (85.76 millones de hectáreas) de los suelos están afectados por algún proceso de degradación. Dada la creciente crisis de degradación a nivel mundial, es necesario llevar a cabo un monitoreo de la calidad del suelo que permita informar la toma de decisiones en cuanto a su manejo en pro de la conservación y sostenibilidad del suelo.

La preocupación por la creciente degradación del suelo ha promovido diversas acciones, entre ellas el desarrollo de nuevos campos de conocimiento y el monitoreo del suelo en los agroecosistemas. Motivada por estas y otras problemáticas, la agroecología es un área relativamente nueva que estudia la interacción de los diferentes componentes del agroecosistema, fomenta un conjunto de prácticas que optimicen y estabilicen la producción, y promueve la justicia social, fortalece la identidad y la cultura, y contribuye a la economía de las zonas rurales (Altieri y Nicholls, 2012). A pesar de ser un campo reciente, la agroecología ha dado

paso a un entendimiento crucial de los agroecosistemas y a una mejora en el manejo que lleve a su sostenibilidad (Laishram, et al., 2012). En las prácticas agroecológicas, son cruciales las herramientas que permiten un monitoreo de los sistemas agrícolas, incluyendo los indicadores de calidad del suelo, ya que logran conjuntar la información edafológica y ecológica para verificar si las funciones de este recurso se cumplen adecuadamente, permitiendo así entender este recurso y encaminar a su conservación.

❖ **Indicadores de calidad de suelo: una herramienta para el monitoreo del suelo**

Los indicadores son herramientas útiles para la evaluación de sistemas en diversos aspectos. De acuerdo con la OCDE (1993), un indicador es un parámetro o variable que ofrece información sobre un fenómeno, representan una condición y conllevan información acerca de sus cambios o tendencias, permitiendo así simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Para que una variable pueda ser considerada un indicador, debe cumplir con ciertos requisitos como validez científica, claridad, con información disponible requerida para su medición, confiabilidad, representatividad en el marco de la preocupación de interés, factibilidad para su elaboración, interpretación y monitoreo, independencia respecto de otras mediciones, con respuesta sensible a cambios, comparabilidad en el marco regional y nacional, y utilidad en cuanto a la información que generan (Bautista, et al., 2004). Los indicadores permiten el monitoreo y evaluación de las variables clave de un sistema mediante su comparación en el tiempo con referentes externos e internos, lo que a su vez permite orientar la toma de decisiones de acuerdo con el objetivo planteado (Cantú, et al., 2007). Estas herramientas pueden aplicarse en diversos campos de conocimiento como economía, salud, ecología y edafología. Existen numerosos indicadores de la calidad del suelo que resultan sumamente útiles para enfrentar procesos de degradación del suelo.

El monitoreo del suelo permite describir y evaluar su estado, permitiendo así encaminar hacia la sostenibilidad a este componente base en los agroecosistemas. Con la finalidad de proteger los suelos, es necesario evaluar los cambios en su calidad mediante atributos sensibles al manejo y a las condiciones edafoclimáticas (Astier-Calderón, et al., 2000). Los indicadores de calidad reúnen estos atributos y proporcionan información sobre propiedades, procesos y características físicas, químicas y biológicas (Bautista, et al., 2004). Indicadores físicos ampliamente utilizados son la densidad aparente, la estabilidad de agregados, la infiltración, la profundidad superficial, la estructura, la porosidad, y la capacidad de almacenamiento de agua. Estos indicadores físicos reflejan la forma en que el suelo capta, retiene y circula el agua a las plantas, así como las limitaciones potenciales para el desarrollo de las raíces y las plántulas. Por su parte, los indicadores químicos son condiciones que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad del agua y nutrientes para plantas y microorganismos (SQI, 1996). Entre estos indicadores están el carbono orgánico total, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico y la capacidad amortiguadora. En cuanto a los indicadores biológicos, se incluyen factores que afectan la abundancia de micro y microorganismos, incluyendo bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, y artrópodos, así como sus productos, tales como la tasa de respiración, tasa de descomposición, nitrógeno y carbono de la biomasa microbiana (SQI, 1996). Aunado a estas propiedades utilizadas como indicadores por los científicos, existen características observadas en el campo por los

productores y utilizadas como indicadores. Estas incluyen el color de la tierra, la textura determinada con la mano, el grado de compactación a simple vista, entre otros. Estas observaciones de campo son válidas como indicadores pues dan información sobre la condición del suelo. Dentro de los indicadores utilizados por los científicos y por los productores son escasas las variables biológicas incluidas, sobre todo las referentes a las plantas, organismos que proporcionan información importante sobre la condición del suelo y que, por lo tanto, pueden ser herramientas importantes para la construcción de indicadores potenciales para evaluar la calidad del suelo.

En los agroecosistemas, las plantas de cultivo son relativamente poco utilizadas como fuente de información para inferir la calidad del suelo, a pesar de que tienen una relación directa con él, pues sus características responden a las condiciones edáficas. En el campo, los productores ponen atención a la coloración de las hojas para detectar deficiencias nutrimentales, pero además de esta característica, el uso de otras variables u órganos de las plantas es limitado como fuente de información para inferir las condiciones del suelo. Se han realizado estudios evaluando características de las hojas y raíces, principalmente, y su respuesta a diversas condiciones ambientales como la humedad del suelo, sequía, cantidad de luz, nutrimentos presentes, entre otras (Cornwell y Ackerly, 2009; Reich, et al., 2003). Son escasas las investigaciones en las que se proponen características funcionales como indicadores de la calidad del suelo, por lo que este trabajo es precursor, ampliando el conocimiento de los rasgos funcionales de las plantas en todos sus órganos (hojas, tallo y raíces) y su relación con variables edáficas, que permita inferir la calidad del suelo y la productividad del cultivo.

❖ **Rasgos funcionales en plantas: una aproximación como indicadores**

Los organismos se aclimatan y adaptan a las diversas condiciones ambientales recurriendo a estrategias relacionadas con propiedades específicas de cada especie conocidas como rasgos funcionales. Los rasgos funcionales son atributos morfológicos, fisiológicos, fenológicos, bioquímicos y regenerativos medibles a nivel de un individuo que influyen en su crecimiento, reproducción y supervivencia (Vandewalle, et al., 2010). Estas características se vinculan con obtención de recursos como agua, luz, CO₂, y nutrimentos minerales, así como con la respuesta a condiciones ambientales como exceso o escasez de luz, nutrimentos, temperatura, inundaciones, sequías, competencia con otras plantas, plagas y herbivoría (Lambers, et al., 2008, Reich, et al., 2003). Existe una amplia variedad de rasgos funcionales que reflejan la forma en que las plantas responden a las condiciones ambientales (y por lo tanto al suelo) y que proveen información de las diferentes estrategias ecológicas de las plantas (Lavorel y Garnier, 2002; Cornelissen, et al., 2003; Violle, et al., 2007).

Las estrategias ecológicas de las plantas dependen en gran medida de la disponibilidad de los recursos en el ambiente. Así, se ha descrito un gradiente en las estrategias para el uso de recursos como luz, agua y nutrimentos (Díaz, et al., 2004; Wright, et al., 2004; Freschet, et al., 2010). En un extremo de este gradiente encontramos especies de crecimiento lento y con un uso más conservativo de los recursos, lo que les permite ser más competitivas en ambientes pobres y secos. En el otro extremo se encuentran especies con estrategia adquisitiva y por lo tanto de crecimiento rápido y elevada tasa de procesamiento de recursos, lo que les permite ser dominantes en zonas más húmedas y fértiles (Reich, et al., 1999; Domínguez, et al., 2012). Este

“espectro económico” como patrón general se ha planteado a nivel de las hojas (Wright y Westoby, 2002; Wright, et al., 2004; Fyllas, et al., 2009), tallo (Chave, et al., 2006; Baraloto, et al., 2010) y las raíces (Ho, et al., 2005; Roumet, et al., 2016). Algunos trabajos han propuesto que estos espectros estarían coordinados entre hojas, tallos y raíces (Reich, et al. 1998; Freschet, et al. 2010). Uno de los factores ambientales que influyen en gran medida en el crecimiento y desarrollo de las plantas es el suelo, por lo que diversos rasgos podrían estar reflejando las condiciones de éste a través de su expresión.

Las condiciones edáficas afectan fuertemente el desarrollo de las plantas de cultivo. Las características del suelo que determinan su calidad, como las concentraciones de nutrientes, la estructura, la aireación, la salinidad, pH, el agua disponible, las comunidades de macroinvertebrados entre otras (Comas, et al., 2013), afectan la expresión de características tales como el porcentaje y duración de la germinación de las semillas, la penetrabilidad de las raíces y su longitud, la altura de la planta, el tamaño de las hojas, la cantidad y peso de los frutos, entre otras (García, et al., 2012). A su vez, estas características vegetales influyen en la productividad del sistema y en los ciclos biogeoquímicos, así como en la vulnerabilidad de los agroecosistemas ante el cambio climático (Vandewalle, et al., 2010). Sin embargo, es amplia la respuesta de los cultivos a las condiciones edáficas, y difieren en los distintos tipos de agroecosistemas existentes en el mundo por sus características específicas.

El uso de los rasgos funcionales de las plantas para inferir la calidad del suelo u otras características de los agroecosistemas ha sido muy limitado. En el caso del frijol, se ha estudiado el efecto de la sequía sobre características morfofisiológicas radicales, sobre la biomasa aérea de la planta (Polanía, et al., 2012), así como sobre parámetros relacionados con el crecimiento, como el área foliar, y el rendimiento, como el número de vainas por planta (Acosta y Kohashi, 1989). Asimismo, se ha mostrado que la salinidad del suelo, debida principalmente a la aplicación excesiva de fertilizantes, tiene efectos sobre el área foliar y la conductancia estomática (Brugnoli y Lauteri, 1991). En cuanto a la concentración y disponibilidad de los nutrientes en el suelo, el fósforo moldea la orientación y el ángulo de crecimiento de las raíces, y afecta la biomasa total de la planta de frijol (BurrIDGE, et al., 2016). Una baja disponibilidad de este elemento, junto con las sequías, es una de las principales limitaciones para la producción de frijol. Sin embargo, la información acerca del comportamiento de los rasgos funcionales ante propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo aún es escasa. Los rasgos funcionales permiten ampliar el entendimiento sobre la relación planta-suelo y la estrategia ecológica de la planta. Este trabajo propone examinar diversos rasgos funcionales en la búsqueda de potenciales indicadores de calidad de suelo en sistemas productores de frijol, herramientas que serán útiles para llevar a cabo una gestión y manejo adecuados de cada uno de los diversos agrosistemas mejorando su productividad, beneficiando a los agricultores, comunidades, a la economía del país y a la conservación de la biodiversidad, logrando así la generación de agroecosistemas sostenibles. En el Cuadro 2 se enlistan los rasgos que fueron considerados en el presente trabajo por estar asociados con el crecimiento y desarrollo de la planta, reflejando las estrategias de adquisición de elementos esenciales del suelo como agua y nutrientes.

Cuadro 2. Listado de los rasgos funcionales de plantas considerados en este trabajo. Se muestran los rasgos funcionales medidos en cada órgano de la planta, su descripción y las mediciones realizadas para su estimación (modificado de Estrada-Salinas, 2018).

Órgano	Rasgo funcional	Descripción	Medición	Referencia
Hoja	Espesor de la hoja	Relacionado con el SLA (ver abajo) y la resistencia física de la hoja. Se encuentra determinado por el número y espesor de las capas del mesófilo de la hoja. Determina la cantidad de luz absorbida y la difusión de CO ² en las hojas.	Medición a lo largo de la lámina evitando las venas, márgenes y base de la hoja. En mm. Medido en 5 hojas desarrolladas completamente, por individuo. En 10 individuos por parcela.	Modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Westoby, et al., 2002; Garnier, et al., 1999
	Contenido Foliar de Materia Seca (LDMC, Leaf Dry Matter Content)	Correlación positiva con densidad tejido e inversión en defensas estructurales y negativa con las tasas de descomposición de la hojarasca. Hojas con alto LDMC tienden a ser más resistentes. Comúnmente las hojas con bajo LDMC están asociadas a ambientes y suelos poco ricos en nutrientes.	Masa seca al horno ÷ masa fresca saturada de agua. En mg/g. Medido en 5 hojas desarrolladas completamente, por individuo. En 10 individuos por parcela.	Cortez, et al., 2007; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Área Foliar Específica (SLA, Specific Leaf Area)	Relación entre una unidad de adquisición (área) y la inversión en recursos (masa). Representa el costo de construir un mm ² de área foliar. Hay mayor SLA en ambientes con altos niveles de nutrientes, pero las hojas tienen menor longevidad.	Área foliar (cm ²) ÷ masa seca foliar (g). Medido en 5 hojas desarrolladas completamente, por individuo. En 10 individuos por parcela.	PrometeusWiki, 2013; Salgado-Negret, 2015; Reich, et al., 1999; Wright, et al., 2004; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Reich, 2014
	Densidad del Tejido Foliar (LTD, Leaf Tissue Density)	Correlación positiva con el contenido de materia seca e inversión en defensas estructurales y negativa con las tasas de descomposición de la hojarasca. Presenta	Masa seca foliar ÷ volumen fresco foliar. En g/cm ³ .	Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Shipley y Vu, 2002.

		una relación positiva con el LDMC (ver abajo).	Medido en 5 hojas desarrolladas completamente, por individuo. En 10 individuos por parcela.	
	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y del propio sistema.	Peso seco en gramos. Medido en todas las hojas del individuo. En 10 individuos por parcela.	Fonseca, et al., 2009; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Concentración de N: P	Representan la cantidad total de nitrógeno y fósforo por unidad de peso seco foliar. Altas concentraciones de N y P en hojas y raíces indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual.	Método de Kjeldahl (para N) y método de colorimetría azul de molibdeno (para P). Medido en una muestra molida formada por 5 hojas desarrolladas completamente, sin herbivoría por individuo. En 5 individuos por parcela.	Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Altura de la planta	Asociada a la forma de crecimiento, a la posición de la planta en el gradiente vertical de luz, al vigor competitivo, al tamaño reproductivo, a la fecundidad y al potencial de vida útil.	Distancia desde la superficie del suelo hasta la yema apical, excluyendo las inflorescencias o estructuras reproductivas. En cm. Medido en 10 individuos por parcela.	Cornelissen, et al., 2003; Modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013

Tallo	Diámetro basal del tallo	Proporciona una estimación del costo de elevar órganos (p.ej. hojas) por encima de las plantas vecinas u otras obstrucciones de luz. Además, da una aproximación del tamaño máximo alcanzado por la planta ya que covaría fuertemente con la longitud del tallo.	Porción más cercana a la tierra por encima de ensanchamientos locales. En cm. Medido en 10 individuos por parcela.	Niklas, et al., 2006
	Densidad Específica del Tallo (SSD, Stem-Specific Density)	Importante para la estabilidad, la hidráulica, la defensa, la ganancia de carbono y el potencial de crecimiento en las plantas. Bajo SSD se relacionan con un rápido crecimiento y alta mortalidad del individuo. Alto SSD se relacionan con tasas bajas de crecimiento, pero mayor supervivencia.	Masa seca al horno ÷ volumen fresco. En g/cm ³ Medido en 10 individuos por parcela.	Poorter, et al., 2008; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y del propio sistema.	Peso seco en gramos. Medido en 10 individuos por parcela.	Fonseca, et al., 2009; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Densidad de la Longitud Radical (RLD, Root Length Density)	Es un rasgo que indica la intensidad de la exploración de la raíz y la capacidad de una especie para tomar nutrientes del suelo.	Longitud de la raíz ÷ volumen de suelo. En cm/cm ³ .	Pérez-Harguindeguy, et al., 2013
	Arquitectura radical	Se reacciona con la competencia y toma de nutrientes.	Ubicación, distribución, cantidad, longitud y formas de aquellos caracteres que constituyen la expresión externa de la raíz.	Department of Plant Science, 2016
	Contenido Radical de Materia Seca (RDMC, Root Dry Matter Content)	Similar a la densidad de la raíz. Altos valores de este rasgo están relacionados con una alta densidad de los tejidos radicales e inversión en defensas estructurales, pero con bajas tasas de	Masa seca de las raíces finas ÷ masa fresca de raíces finas saturada de agua. Expresado en mg/g.	Salgado-Negret, 2015

		descomposición.		
	Densidad del Tejido Radical (RTD, Root Tissue Density)	Presenta una relación positiva con el RDMC. Altos valores de RTD están correlacionados con una mayor resistencia a la ruptura, daños por herbívoros y la sequía, con menores tasas de descomposición y mayor longevidad, pero se relaciona negativamente con la absorción de nutrimentos.	Masa seca radical ÷ volumen fresco de dicha masa de raíces. En g/cm ³ .	Fortunel, et al. 2012; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; PrometheusWiki, 2013; Birouste, et al., 2014
	Biomasa	Cantidad de materia orgánica contenida en la planta o en alguna de sus partes. En sistemas de cultivo, la biomasa brinda información sobre el rendimiento y productividad de las plantaciones y del propio sistema.	Peso seco en gramos.	Fonseca, et al., 2009; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
Raíz	Longitud Radical Específica (SRL, Specific Root Length)	Rasgo equivalente al SLA para las raíces y hace referencia a la relación entre una unidad de adquisición (longitud) y la inversión en recursos (masa). Plantas con alto SLR construyen raíces más largas, tienen mayores tasas potenciales de absorción de agua y nutrientes, menor vida y tasa de crecimiento superior que plantas de baja SLR.	Longitud de raíces finas ÷ peso seco de las raíces finas. En cm/g.	Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015
	Densidad del Peso Radical (RWD, Root Weight Density)	Medida de la biomasa de la estructura de asociación de la planta por unidad de volumen de suelo.	Biomasa de raíz ÷ volumen de suelo. En g/cm ³	Ball-Coelho, et al., 1998
	Área Superficial Específica (SSA, Specific Surface Area)	Rasgo similar al SLR y representa la relación entre el área de adquisición (área) y la inversión en recursos (biomasa).	Área de raíces finas ÷ masa seca de las raíces finas.	Himmelbauer, 2004; Comas, et al., 2013
	Contenido de N: P	Representan la cantidad total de nitrógeno y fósforo por unidad de peso seco foliar. Alto contenido de N y P en hojas y raíces indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual.	Método de Kjeldahl (para N) y método de colorimetría azul de molibdeno (para P).	Pérez-Harguindeguy, et al., 2013

❖ **Frijol: un cultivo de importancia nacional**

El frijol es uno de los cultivos más importantes en México. Nuestro país es centro de origen de diversos tipos de frijol, siendo la especie más importante *Phaseolus vulgaris* L., de la que se cultivan cerca de 70 variedades (Delgado-Salinas, 2012). En la dieta de la población mexicana, el frijol sobresale como fuente rica en proteínas, en especial de aminoácidos como tiamina y niacina, e hidratos de carbono, vitamina del complejo B y ácido fólico. Asimismo, el frijol proporciona hierro, cobre, zinc, fósforo, potasio, magnesio y calcio, además de tener alto contenido en fibra (Sangerman-Jarquín, 2010). El frijol también tiene propiedades medicinales, por ejemplo, reduce el riesgo de enfermedades como algunos tipos de cáncer, diabetes, enfermedades del corazón y del sistema sanguíneo (Bennink, 2005). El frijol es la leguminosa de mayor consumo humano, representando el 36% de la ingesta diaria de proteínas en México. Entre las leguminosas, es el tercer cultivo con mayor contenido proteico (20-25%), después de la soya y el cacahuete. Es además el segundo cultivo por superficie destinada a su producción (1.7 millones de ha.) después del maíz (Singh et al., 1999). La mayor producción nacional se da en Zacatecas, Sinaloa, Durango, Chiapas, Chihuahua, Nayarit, San Luis Potosí y Guanajuato, estados que producen el 54.5% del total nacional (SIAP, 2016). Así, el frijol se posiciona como un producto estratégico en el desarrollo rural y social, ya que cumple funciones en el sector alimentario y es considerado como un alimento tradicional y de identificación cultural. No obstante, el frijol posee características específicas y requerimientos edafoclimáticos como toda planta.

El frijol pertenece a la familia Fabaceae (Leguminosae), subfamilia Papilionoidea, género *Phaseolus* y especie *Phaseolus vulgaris*. Es una planta anual cuya altura varía entre cincuenta y setenta centímetros, con foliolos de tres hojas y flores de colores claros. El fruto es una vaina comestible, que va abriendo naturalmente cuando está madura y contiene a las semillas, que es a lo que se le conoce como frijoles, de la variedad depende la forma y color de las semillas (Martirena-Ramírez, et al., 2017). Las raíces de la planta se desarrollan como una principal y muchas otras secundarias, cercanas a la superficie, con tallos delgados y débiles. Algunas raíces presentan nódulos donde se encuentran las bacterias simbióticas que fijan el nitrógeno del aire. El frijol presenta un ciclo de vida corto, pues las vainas del frijol pueden ser cosechadas entre 45 y 90 días después de la siembra. El desarrollo de este cultivo se lleva a cabo de mejor manera en un clima templado y tropical, a temperatura entre 20° y 25°C. El frijol es tolerante a la sequía, a la sombra y poco tolerante a las inundaciones. La planta se adapta a latitudes de hasta 1500 msnm, sin exceso de humedad en el ambiente ni con oscilaciones drásticas, ya que esto eleva la posibilidad de desarrollar enfermedades aéreas, dificultando la fecundación (SEDEA, sin año).

En cuanto a las condiciones edáficas, *Phaseolus vulgaris* prefiere suelos franco-limosos a arenosos, profundos, ricos en materia orgánica y con buena permeabilidad, ya que la planta es sensible a los encharcamientos. Prefiere suelos con pH neutro (SEDEA, sin año), sin exceso de salinidad pues se ha reportado que el rendimiento comienza a disminuir a partir de una conductividad eléctrica de 2 dS/m (Subbarao y Johansen, 1994). La salinidad provoca el retraso general del crecimiento, disminuye el tamaño de las plantas, y afecta la etapa y tasa de germinación, longitud del tallo,

ramificación, tamaño de hojas y la longitud, peso fresco y seco de la raíz (Gutiérrez, et al., 2005; Gama, et al., 2007; Can, et al., 2014). Por otra parte, la carencia de nutrimentos en el suelo repercutirá negativamente en la floración y en la producción de la planta de frijol. De acuerdo con Bernal, et al., (2007) la falta de fósforo reduce el peso seco de las raíces y de la parte aérea, mientras que la deficiencia de nitrógeno afecta parámetros relacionados con la fotosíntesis y el crecimiento de la planta (Lima, et al., 1999). En general, variables edáficas como la textura, el pH, la conductividad eléctrica, la densidad aparente, la capacidad máxima de retención de agua, la concentración y cantidad de nitrógeno, fósforo y carbono, influyen en la calidad del suelo y por lo tanto en el desarrollo y calidad del cultivo de frijol. Por ello, los efectos de las condiciones edafoclimáticas deben tomarse en cuenta para el manejo del cultivo de frijol, para así obtener un mejor desarrollo del cultivo y rendimiento.

La presente investigación se enfoca en el estudio de agroecosistemas productores de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en dos zonas contrastantes en cuanto a clima en el Estado de Guanajuato. Dado que el clima es un importante factor formador del suelo, se espera que las condiciones edáficas difieran en dichas zonas. En las zonas de estudio se describen propiedades físicas y químicas del suelo, así como rasgos funcionales de la planta de frijol, con el propósito de conocer la respuesta que tienen las plantas ante diferentes condiciones del suelo y con ello determinar qué condiciones edafocológicas favorecen al cultivo, y al mismo tiempo identificar rasgos funcionales que presentan fuerte asociación con el suelo. Estos rasgos representan candidatos potenciales como variables indicadoras de la calidad del suelo, pues son características que pueden ser identificadas directamente por el agricultor en su parcela, quienes son un elemento clave debido a su relación directa con los agroecosistemas, lo que las hace eficaces y de fácil implementación. Así, la identificación de estas características contribuye a un avance importante en el monitoreo de agroecosistemas de gran importancia a nivel nacional, permitiendo mejorar la toma de decisiones sobre el manejo dado al cultivo del frijol y al uso sostenible del suelo.

III. OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la relación entre variables edafológicas y rasgos funcionales de frijol en dos ecorregiones de Guanajuato, con el fin de proponer algunos rasgos como potenciales indicadores de calidad del suelo y productividad del cultivo.

Objetivos particulares

- Identificar las propiedades físicas y químicas de suelos de nueve parcelas de cultivo de frijol en dos localidades contrastantes climática y edafológicamente en el estado de Guanajuato.
- Medir variables de productividad de los cultivos de frijol en las parcelas estudiadas
- Estimar cuantitativamente la relación entre variables físicas y químicas del suelo con los rasgos funcionales de las plantas de frijol en las nueve parcelas de estudio.
- Estimar cuantitativamente la relación entre las variables físicas y químicas del suelo con la productividad de las nueve parcelas.

- Identificar los rasgos funcionales con mayor asociación con propiedades edáficas para ser propuestos como potenciales indicadores de calidad del suelo.

IV. HIPÓTESIS

Las condiciones edáficas influirán en la expresión de los rasgos funcionales de las plantas de frijol. Esta influencia será congruente con lo descrito por los “espectros económicos” que se han descrito en las plantas silvestres (Reich, et al., 2014). Se espera que los suelos con baja calidad para el desarrollo del cultivo de frijol, sean aquellos que presenten baja concentración de materia orgánica, nutrimentos, disponibilidad de agua, una textura arcillosa, alto nivel de compactación y mayor cantidad de sales. En estos suelos predominaran plantas con una estrategia de uso/adquisición de recursos conservativa, es decir, con procesos metabólicos lentos, cuyas estructuras serán más densas, con mayor cantidad de nutrimentos y biomasa, pero con menor productividad.

En contraste, los suelos de alta calidad serán aquellos con mayor concentración de materia orgánica, nutrimentos, disponibilidad de agua, con textura franco-arenosa, bajo nivel de compactación y menor cantidad de sales. En estos suelos se desarrollarán plantas con una estrategia de uso/adquisición de recursos adquisitiva, es decir, con procesos metabólicos rápidos, cuyas estructuras serán menos densas, con menor biomasa, con menor concentración de nutrimentos en las estructuras, plantas más y más productivas. En la Figura 1 se resumen las predicciones para los patrones de variación de rasgos funcionales y variables de productividad con base en las condiciones edáficas en las que crezca la planta.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

▪ Sitio de estudio

En el presente estudio se seleccionaron dos comunidades localizadas en dos provincias fisiográficas contrastantes del estado de Guanajuato, uno de los principales productores de frijol en México. La Quemada ubicada en el municipio de San Felipe, al Norte del estado, y Guarapo, ubicado en el municipio de Valle de Santiago en el Sur de Guanajuato. Guanajuato se encuentra ubicado entre los 19°55'08" y los 21°52'09" de latitud norte, y entre los 99°39'05" y los 102°05'02" de longitud oeste. La superficie de su territorio es de 30471.06 km², ocupando el vigésimo segundo lugar entre las entidades del país por su extensión superficial. Se encuentra ubicado entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental; en el norte alcanza la Mesa Central y por la parte sur es cruzado por la Faja Volcánica Transmexicana. Por las características mencionadas, las condiciones climáticas tienen poca influencia marítima, sin embargo, el efecto de montaña ocasiona que en este territorio existan condiciones semisecas y muy secas, principalmente durante verano y otoño (INAFED, sin año(a)). Las zonas de estudio seleccionadas presentan condiciones ambientales con notable contraste. Un ejemplo claro de ello es la diferencia en el clima, lo que puede observarse en la Figura 2.

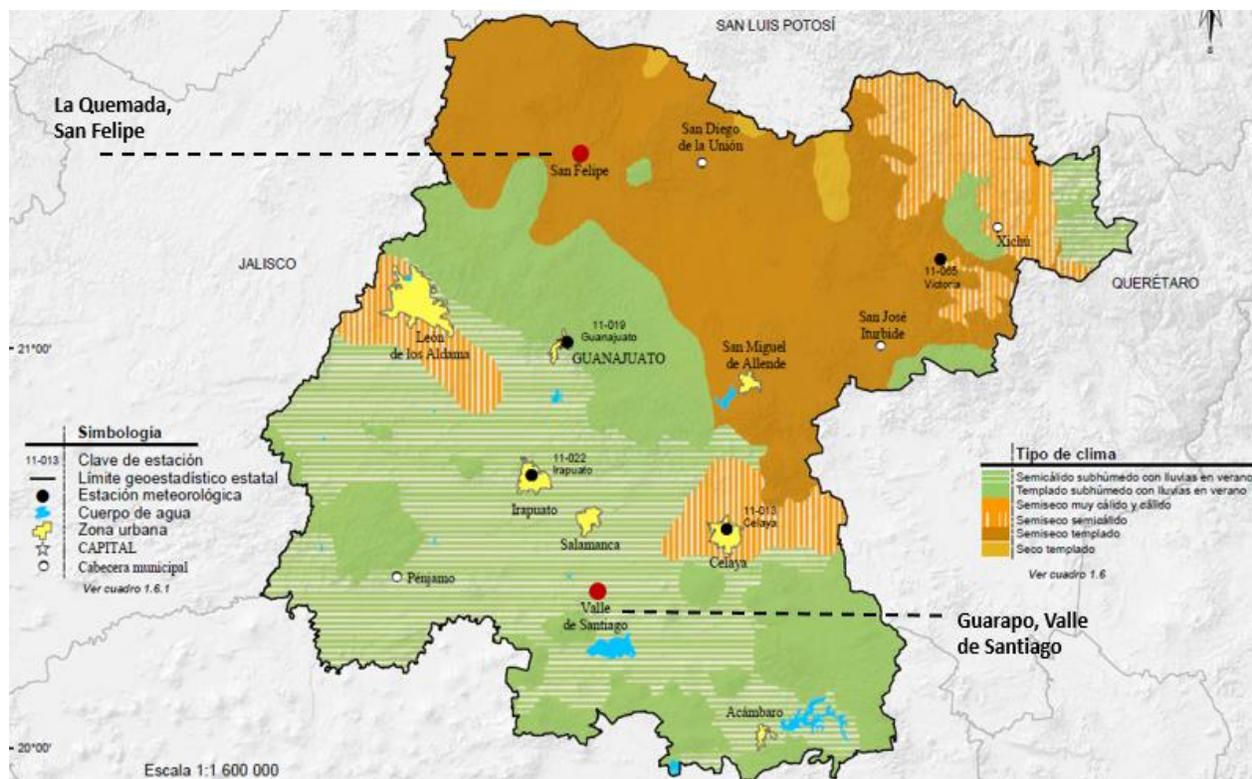


Figura 2. Mapa climático de Guanajuato donde se muestran las dos zonas seleccionadas para el estudio (Fuente: INEGI, 2013).

La Quemada

La localidad de La Quemada se sitúa en el municipio de San Felipe, al norte del estado de Guanajuato, en las coordenadas 21° 28'51"N, 101°12'49" O, con una altitud de 2089 msnm. San

Felipe es el municipio con mayor extensión territorial dentro del estado de Guanajuato con 2969.79 km², equivalente al 9.5% de la superficie total del estado (INAFED, 2005). Se localiza en la provincia fisiográfica denominada Mesa del Centro, particularmente en la subprovincia Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato (SEDESOL, 2013). En el lugar, se pueden encontrar desde altas montañas y extensas cordilleras, hasta vastas planicies o valles, destacando cerros y cordilleras que en promedio tienen una altura de 2600 msnm. En cuanto a la hidrografía, se pueden encontrar varias corrientes acuáticas, pero con escaso caudal. El clima de la zona es BS1 Kw, es decir, semiseco templado con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 16.7°C, y una precipitación media anual de 473.4 milímetros. En cuanto a la geología del sitio, la roca predominante es ígnea extrusiva como riolita-toba ácida, riolita y basalto; también se pueden encontrar rocas ígneas intrusivas como granodiorita, y sedimentarias como areniscas y conglomerados (INEGI, 1998).

Debido a las condiciones de baja humedad de La Quemada, la flora se caracteriza por zacates, órganos, magueyes y nopales. En algunas zonas se pueden encontrar variedades de coníferas, mezquites y huizaches. Dentro de la fauna predominan los roedores, como conejos, liebres, ardillas y tejones; también existen aves locales como tordo, codorniz, águila, halcón, zopilote y gavián, así como aves migratorias durante invierno como los patos, y herbívoros como venados y ciervos (INAFED, 2005).

El suelo de este sitio es de textura franco-arenosa a arcillosa, de origen coaluvial a aluvial y con un pH de 6 a 7.8. Algunos de los suelos dominantes son: Phaeozem, Leptosol, Durisol, Luvisol, Panosol, Regosol, y Vertisol. Como consecuencia de la orografía, se han desarrollado diferentes unidades de suelo de acuerdo con la topografía. En las partes planas se pueden encontrar Planosoles mólicos, Phaeozems háplicos y Xerosoles háplicos, que tienen buena fertilidad en la capa superficial arable, facilitando aún más el manejo del suelo para los cultivos por su textura media. En las partes altas, las condiciones del sustrato edáfico se vuelven adversas para los cultivos, pues dominan los Leptosoles, aflorando totalmente las rocas ígneas extrusivas o sedimentarias (INAFED, 2005; INEGI, 1997).

Entre los principales recursos naturales que aprovecha la población están las tierras de cultivo y los pastos para la cría de ganado. En el municipio al que pertenece La Quemada, San Felipe, el 33% del área tiene un uso de suelo agrícola y 40.8% un uso de suelo de pastizal. La agricultura es una de las actividades más importantes en San Felipe, contribuyendo al 18.7% del PIB estatal (SDES, 2010). Entre los principales productos están el maíz, frijol, trigo en grano, cebada en grano y avena forrajera. Sin embargo, la escasa infraestructura y restricciones del medio natural limitan el uso del suelo, teniendo una mayor importancia los cultivos de temporal como el maíz y granos pequeños como el frijol. En la zona existen cultivos con riego y de temporal. Algunos son producidos para subsistencia de la población y otra parte para comercializar, sobre todo los productos derivados de las parcelas de riego que tienen mayor producción. En la Cuadro 3 se muestran los principales cultivos de San Felipe y sus respectivos valores en volumen y valor económico, de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Económico Sustentable (SDES, 2010).

Cuadro 3. Valor de volumen y económico de los principales cultivos en el Municipio de San Felipe, Guanajuato.

Tipo de cultivo	Volumen (Toneladas)			Valor (Miles de pesos)		
	Total	Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal
Maíz Grano	25998	24000	1998	63996	60000	3996
Chile Verde	11520	11520	0	92160	92160	0
Frijol	4560	2560	2000	48160	28160	20000
Alfalfa Verde	214800	214800	0	96660	96660	0
Pastos	8415	8415	0	2945	2945	0

Guarapo

El ejido de Guarapo se localiza en el Municipio de Valle de Santiago, al sur de Guanajuato, en las coordenadas 20°23'02.00"N y 101°24'36.00"O, a 1700 msnm. Presenta una superficie de 820.1 km², comprendiendo el 2.7% del territorio estatal. El municipio se ubica en el Bajío Mexicano, por lo que se encuentra asentado en un valle rodeado de grandes cerros, un grupo de volcanes de trece cráteres. Asimismo, se encuentra en la provincia fisiográfica denominada Faja Volcánica Transmexicana, ubicándose entre dos subprovincias, el Bajío Guanajuatense y los Bajíos Michoacanos (SEDESOL, 2013). El clima es semicálido subhúmedo con intensas lluvias en verano, una temperatura media anual de 19.8°C, y precipitación media anual de 564.8 milímetros (INEGI, 1998).

La vegetación presente en el lugar está conformada por huizaches, palos blancos, ahuehuetes, mezquites, pirules, nopales, sauces, sabinos, pinos, palo blanco, palo prieto, palo dorado, parota, entre otros. La fauna predominante incluye gavilanes, ardillas, liebres, conejos, tlacuaches, mirlos, hurras, coyotes, palomas, golondrinas, búhos, víboras, principalmente (INEGI, 2009a).

En la zona, los suelos son de estructura granular, de textura franco-arenosa a arcillosa de origen coaluvial a aluvial, y un pH de 5.4 a 7. Los suelos dominantes son Vertisoles (82%) y Phaeozems (15.5%) (Gobierno Municipal, 2012). El 71% de la superficie del municipio está ocupada por tierras de cultivo, el 6.4% por pastizales, el 0.5% por bosques y el 22% por matorrales. En el suroeste del municipio se encuentran tres fallas geológicas, por lo que se considera una zona de riesgo geológico y de baja sismicidad. Dentro de los recursos naturales aprovechados en Valle de Santiago se encuentran las tierras de cultivo agrícola y los pastos para la cría de ganado. Aproximadamente 28,143 ha son dedicadas para agricultura de riego, mientras que para agricultura de temporal se destinan 21,151 hectáreas, siendo los principales cultivos el maíz, sorgo, frijol y cebada (Gobierno Municipal, 2012).

En el estado de Guanajuato, el frijol es uno de los cultivos más importantes de acuerdo con datos estadísticos del INEGI, ocupando el segundo lugar a nivel nacional en la década de los noventa en cuanto a superficie sembrada (INEGI, 1997). El principal frijol que se produce en Guanajuato es Flor de mayo y Flor de junio, debido a que son las razas preferidas, tanto por el consumidor como por el productor. La siembra del frijol de temporal se lleva a cabo durante junio y julio, efectuándose la cosecha en el mes de octubre. En ocasiones, se obtienen bajos rendimientos de este cultivo, debido principalmente a fuertes sequías (mayormente en el norte del estado), y daño causado por enfermedades y por plagas (SAGARPA, 2015).

La variedad de frijol con la que se trabajó en este proyecto es Flor de junio. La forma del grano es semi-ovalada, color crema con rayas rosa. La planta es de hábito indeterminado, de tamaño mediano con un ciclo intermedio, y madura de 100 a 110 días dependiendo de las condiciones del clima. El tamaño de las semillas es medio; 100 semillas pesan entre 32 y 36g. Es una semilla visualmente atractiva, de rápida cocción y por ello, de buena comercialización (INIFAP, 2008).

▪ **Selección de parcelas**

La selección de los sitios de muestreo se realizó tratando de abarcar la mayor diversidad posible de condiciones en cuanto al tipo de suelo y prácticas de manejo aplicadas por parte de los agricultores. Originalmente estaba planeado realizar el muestreo en doce parcelas, seis en cada región. Sin embargo, algunas parcelas de la Quemada fueron descartadas del estudio, debido a la falta de desarrollo de las plantas, esto pudo deberse a las condiciones climáticas o a las contingencias en cada parcela. En total se muestrearon nueve parcelas de temporal, seis en Guarapo y tres en La Quemada. En ambas comunidades las parcelas pertenecen a agricultores independientes, que de manera cotidiana se dedican a la producción de maíz y frijol para el autoconsumo. La variedad de frijol seleccionada para el experimento se conoce como flor de mayo, las semillas fueron proporcionadas por el proyecto y todos los agricultores aceptaron sembrar esta variedad de frijol. Los productores llevaron a cabo el manejo de sus parcelas como habitualmente lo realizan, en la Cuadro 4 se muestra información breve sobre las parcelas.

Cuadro 4. Información de las parcelas de estudio. Se muestra una breve caracterización de las nueve parcelas de estudio, incluyendo el tipo de manejo al que es sometida. Se indica con ✓ la aplicación de la variable y con ✗ la negación en la aplicación de dicha variable.

Parcela	Clave parcela	Región de Guanajuato	Tipo de suelo	Manejo					Tipo de cultivo
				Yunta	Tractor	Fertilizantes químicos	Fertilizantes orgánicos	Plaguicidas	
1	FGS6	Guarapo	Pheozem	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo
2	FGS2	Guarapo	Pheozem	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo
3	FGS3	Guarapo	Pheozem	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo
4	FGS4	Guarapo	Leptosol	✓	✗	✗	✓	✓	Policultivo
5	FGN1	La Quemada	Cambisol	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo

6	FGN2	La Quemada	Cambisol	✓	✗	✓	✗	✓	Monocultivo
7	FGS1	Guarapo	Vertisol	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo
8	FGN4	La Quemada	Fluvisol	✗	✓	✓	✗	✓	Monocultivo
9	FGS5	Guarapo	Pheozem	✗	✓	✓	✗	✓	Policultivo

Prácticas de manejo como la forma de realizar el arado (tractor, yunta o labranza cero), el tipo y cantidad de fertilizante aplicado (químico u orgánico como excremento de ganado o lombricomposta), así como el deshierbe realizado en cada parcela, alteran directa o indirectamente, las propiedades físicas y químicas del suelo, y por ende influyen sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Sánchez, et al., 2011; Brechelt, 2004). Durante el experimento cada productor aplicó sus propias prácticas de manejo en el cultivo, estas diferencias y las diferentes condiciones macroclimáticas de los sitios, permitieron tener un alto grado de variabilidad en los suelos de las parcelas de estudio. Esto generó disparidad en el desarrollo de los cultivos, aumentando la posibilidad de encontrar correlaciones estadísticas entre las condiciones de las plantas y del suelo.

▪ Muestreo de suelos

La evaluación de la calidad del suelo se llevó a cabo por medio de la descripción de un perfil de suelo en cada parcela. Para la selección de los puntos exactos de muestreo edafológico se realizaron recorridos en las parcelas de interés. En cada una se buscó una posición estable en el relieve, es decir, que no estuviera afectada por la erosión o deposición de material edáfico. En la mayoría de los casos, se eligió el centro de la parcela para representar las condiciones edáficas de la parcela, evitando seleccionar sitios atípicos, con condiciones del suelo extremas, o que sólo se pudieran observar en algunas zonas.

Las dimensiones de los perfiles fueron aproximadamente de 1.20 metros de largo por 1.20 metros de ancho, y una profundidad variable hasta el material parental. En cada perfil se llevó a cabo la descripción detallada de todos los horizontes (Siebe et al., 2006). Éstos son capas paralelas a la superficie del suelo que presentan diferentes características al ser producidas por procesos pedogenéticos, lo que marca el estado de desarrollo del suelo (Siebe et al., 2006). Una vez identificados los horizontes, se midió su espesor en cm empleando una cinta métrica. El espesor se evaluó considerando la presencia de aspectos que restringen o impiden la penetrabilidad de las raíces, como la pedregosidad, estructura angular fuerte y alto porcentaje de arcilla (Siebe et al., 2006). Posteriormente se tomó una muestra de aproximadamente un kilogramo de suelo de cada horizonte, debidamente etiquetado, para trasladarlo al laboratorio. Las muestras se secaron a temperatura ambiente para posteriormente tamizarlas, eliminando partículas mayores como rocas o raíces, resultando en un sustrato de tamaño de grano fino (<2mm).

La evaluación edafológica se realizó en todos los perfiles de suelo únicamente a 30 cm de profundidad, que es la profundidad en la que se localizó la mayor parte de las raíces de las plantas

de frijol. Se realizó la descripción detallada de los horizontes correspondientes a dicha profundidad y se colectaron muestras de cada uno para realizar diversos análisis físicos y químicos (Cuadro 5), en el Anexo 2 del presente trabajo se presentan las evaluaciones edafocológicas de los perfiles correspondientes a las parcelas de estudio. En el Laboratorio de Edafología Ambiental (Instituto de Geología, UNAM) a cargo de la M. en C. Kumiko Shimada Miyasaka, se analizó: el pH, la conductividad eléctrica, la densidad aparente y la capacidad máxima de retención de agua. En el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental (LABFER, Colegio de Postgraduados) a cargo de la M. en C. Juliana Padilla Cuevas, se realizaron los análisis de nitrógeno, fósforo y carbono total del suelo y finalmente en el Laboratorio de Biogeoquímica Terrestre y Clima (Instituto de Ecología, UNAM) a cargo de Dr. Julio Campo Alves y el M. en C. Enrique Solís Villalpando, se realizó la textura. Los datos de campo y laboratorio permiten conocer los procesos pedogenéticos que dan origen a la condición del suelo actual, y realizar una evaluación edafocológica de la calidad del suelo. Esto permite evaluar el uso y el manejo del sitio, dando herramientas para un adecuado manejo y conservación del recurso edáfico. A continuación, se describe brevemente el protocolo seguido para la medición de cada una de ellas.

Cuadro 5. Variables edáficas determinadas en los horizontes de suelo a treinta centímetros de profundidad.

Variable edáfica	Unidades	Abreviación
Textura	%	Textura
pH	Unidades de pH	pH
Conductividad Eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	C.E.
Densidad Aparente	g/cm^3	D.A.
Capacidad Máxima de Retención de Agua	$\text{L}/\text{m}^2, \%$	CMRA
Contenido de Nitrógeno	%, kg/m^2	N
Contenido de Fósforo	ppm, g/m^2	P
Contenido de Carbono total	%, kg/m^2	C_t

i) Textura

La textura es el porcentaje de distribución de los tamaños de partículas en el suelo. Es una característica importante, pues dependiendo de la textura es que se pueden inferir otras características del suelo y con ello la calidad de éste (Siebe, et al., 2006). Esta variable fue determinada en el Laboratorio de Biogeoquímica Terrestre y Clima del Instituto de Ecología de la UNAM. La textura se analizó por medio de la técnica de Bouyoucos, que básicamente consiste en medir la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo (arcillas, limos y arenas) a una temperatura constante de 25°C.

Para la medición de textura se pesaron 50 g de suelo seco de los primeros diez centímetros de profundidad del perfil, y se depositaron en tubos de Nalgene, para posteriormente agregar 100 ml de una solución de hexametáfosfato de sodio grado reactivo al 5% dejando reposar toda la noche. Al día siguiente se agitaron los tubos en la centrífuga durante un minuto, se retiraron y a los cuarenta segundos se tomó la primera lectura con el hidrómetro, indicando el porcentaje de arenas, las partículas más grandes. A las dos horas siguientes se tomó la segunda lectura que indicó el contenido de arcillas, partículas más pequeñas. El porcentaje de limo (partícula media) se obtuvo por la diferencia de los dos porcentajes sumados con el 100%.

ii) pH

El valor de pH es una variable que influye en los procesos pedogenéticos, además de que permite hacer inferencias sobre la disponibilidad relativa y movilidad de los nutrientes. Un rango del pH óptimo puede asegurar el máximo nivel de solubilidad de la mayoría de los nutrientes, lo que resulta de gran importancia en los agroecosistemas (Barbaro, et al., 2014).

Para medir esta variable, se pesaron 10 g del suelo tamizado y se colocaron en tubos de Nalgene de 125 ml. Se agregaron 100 ml de agua destilada a cada tubo, se agitaron durante 18 horas para homogeneizar la mezcla, dejando reposar durante una hora. Posteriormente se midió el pH con un potenciómetro sumergiendo el electrodo en la solución sin que tocara la parte sólida y se esperó a que la lectura fuera estable. El electrodo fue enjuagado antes de cada medición. Se calibró el potenciómetro con las soluciones buffer de pH 7 y pH 4. Para una mayor precisión, se realizaron dos repeticiones del mismo horizonte.

iii) Conductividad eléctrica

La concentración de sales solubles en el suelo se determina mediante la conductividad eléctrica (CE). La CE es una medida de la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica, por lo que un valor alto indica que la corriente se mueve fácilmente a través de él, y esto indica, que existe una mayor concentración de sales en el medio (Barbaro, et al., 2014). La presencia de sales puede influir en el desarrollo de los cultivos o de las plantas en general. Esta variable es afectada por diversas variables como las características físicas y químicas del suelo y las prácticas de manejo.

Para medir la conductividad eléctrica se emplearon las mismas soluciones preparadas para la medición del pH y se utilizó un conductímetro. Se sumergió el electrodo del aparato en la solución, sin tener contacto con la parte sólida, y se tomó la lectura. Posteriormente, el electrodo se enjuagó para realizar las mediciones de las muestras siguientes.

iv) Densidad aparente (D.A.)

La densidad aparente es la medida del peso seco del suelo por unidad de volumen (g/cm^3). Es diferente a la densidad real ya que incluye el espacio poroso. Esta variable es un criterio importante para la evaluación del balance hídrico y de nutrientes en el suelo, además de ser clave en la permeabilidad y profundidad fisiológica (Siebe et al., 2006).

Para la medición de la densidad aparente se emplearon muestras que fueron tomadas de tres a cinco cilindros de 100 cm³ para cada horizonte. Las muestras se colocaron en una estufa de secado durante 24 horas a 105 °C en charolas de aluminio. Las charolas se pesaron después de mantenerse en un desecador que impidiera su hidratación. La densidad aparente se calculó dividiendo el peso seco entre el volumen de suelo.

v) Capacidad Máxima de Retención de Agua (CMRA)

La capacidad máxima de retención de agua es una variable que estima la disponibilidad de agua para las plantas. Absorber, retener y proveer agua es una función elemental en un agroecosistema, ya que limita la sobrevivencia y productividad de los cultivos (Domingo, et al., 2006). Por ello, es fundamental determinar el volumen de agua que el suelo puede contener por gravimetría, así como la disponible para las plantas, lo cual puede estimarse a partir de la capacidad máxima de retención de agua. Este parámetro difiere de un suelo a otro debido a diferentes factores como la textura, la profundidad, la permeabilidad, el contenido de materia orgánica y la actividad biológica (FAO, sin año). La humedad del suelo puede alterarse debido a las prácticas de manejo, como la labranza que rompe la estructura del suelo, impidiendo una mayor retención de agua en los poros de los agregados, afectando con ello la disponibilidad para las plantas.

Para la determinación de la capacidad máxima de retención de agua, se pesaron 20-30 gramos de suelo seco al aire, se colocaron en un embudo con papel filtro para saturar el suelo y se filtró dos veces con agua destilada. Esta muestra se dejó escurrir durante dos horas para después pesar el suelo saturado junto con el papel filtro, restando el valor del papel saturado. Se calculó el contenido de agua a saturación con la siguiente fórmula:

$$\text{CMRA [\%]} = (\text{peso saturado del suelo} / \text{peso seco del suelo}) - 1 \times 100$$

Posteriormente, los datos de CMRA en unidades de porcentaje fueron transformados a unidades de volumen (L/m²) por cada horizonte incluidos en los treinta centímetros de profundidad analizados con la siguiente fórmula:

$$\text{CMRA (L/m}^2\text{)} = (\text{CMRA [\%]} * ((100 - \text{pedregosidad [\%]})) / 100) * \text{espesor del horizonte [dm]}$$

vi) Nitrógeno (N)

Los análisis químicos de nutrientes (N, P, y C) fueron realizados por el personal del Laboratorio de Fertilidad de Suelo y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados (Etchevers, 1992). Para determinar el nitrógeno total, se empleó el método semimicro-Kjeldahl basado en la digestión húmeda con ácido sulfúrico. Este método consistió en realizar una digestión de la muestra de suelo con ácido sulfúrico, con una temperatura adecuada que permita que los vapores del ácido se condensen en el interior del cuello del tubo de digestión; posteriormente se dejaron decantar las partículas de sílice, evitando así que los cristales de sulfato de amonio se precipiten. El nitrógeno amoniacal se determinó por titulación con ácido sulfúrico (Álvarez-Sánchez y Marín-Campos, 2011). Con este proceso se obtuvieron las concentraciones de nitrógeno (unidades en porcentaje), posteriormente los datos se convirtieron a unidades de kg m⁻² para obtener la cantidad de nitrógeno en el suelo.

vii) Fósforo (P)

Para determinar el fósforo extractable se empleó una modificación del método de Bray y Kurtz, y colorimetría con azul molibdeno. Esta técnica se basó en la extracción de fósforo del suelo por medio de una solución de fluoruro de amonio en medio ácido, que agitada con el suelo durante un tiempo determinado solubiliza al fósforo. El fósforo es determinado por medio de la reacción del azul de molibdeno por espectrofotometría (Álvarez-Sánchez y Marín-Campos, 2011).

viii) Carbono orgánico total (C)

Para determinar el carbono orgánico total en el suelo se empleó el método de digestión seca a 900°C en el determinador automático de C (modelo SSM-5000A Shimadzu).

▪ Transformación de las variables edáficas para correlacionarlas con rasgos funcionales de plantas

Los análisis de laboratorio proporcionaron un valor de cada variable por horizonte, sin embargo, para obtener un solo valor por cada perfil, en algunas variables como el pH o la conductividad eléctrica, se calculó el promedio ponderado. Este dato toma en cuenta la profundidad de cada horizonte con respecto a la profundidad total del suelo (en nuestro caso 30 cm). Por otra parte, los datos de los análisis de laboratorio proporcionan información de la concentración (porcentaje), sin embargo, para realizar la evaluación edafocológica es necesario transformar los datos de cada horizonte a volumen (kg m^{-2} , L m^{-2} o g m^{-2}). Para obtener un dato de cada variable por perfil, como el N y P, se sumaron los datos de los horizontes orgánicos. Para llevar a cabo esta transformación se empleó la siguiente fórmula:

$$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right] = \frac{((\text{profundidad de horizonte en dm}) * (\text{densidad aparente})) * (100 - \text{pedregosidad})}{(100 * \text{concentración del elemento en } \%)}$$

En el caso del fósforo se realizó el mismo cálculo, pero para obtenerlo en gramos, pues es más escaso que el nitrógeno y el carbono, la fórmula utilizada fue:

$$\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2}\right] = \left(\frac{((\text{profundidad de horizonte en dm}) * (\text{densidad aparente})) * (100 - \text{pedregosidad})}{(100 * \text{concentración de P en ppm})}\right) * 100$$

▪ Selección de individuos y medición de rasgos funcionales en la planta de frijol

Antes de realizar la colecta de plantas, se calculó la densidad de siembra en cada parcela. Para ello, se marcaron cuadrantes de diez metros de largo por seis metros de ancho y se contabilizó el número de surcos y los individuos totales en cada uno, fueran plantas de frijol o maíz, en el caso de policultivos. Esta medición se realizó para conocer si la densidad de siembra es un factor a considerar en la relación del suelo y las plantas.

Las plantas de frijol se colectaron durante los meses de agosto (Guarapo) y septiembre (La Quemada). Esta variación en el tiempo de colecta fue debida a que a pesar de haber sido sembradas en el mismo periodo (junio), las plantas se desarrollaron a diferente velocidad. Las

plantas de la zona húmeda Guarapo) alcanzaron la madurez requerida (antes) antes que las plantas de la zona seca (La Quemada).

En cada parcela se eligieron diez plantas de frijol completamente desarrolladas, saludables, sin presencia de herbivoría o patógenos, y expuestas al sol (Cornelissen et al., 2003; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Se eligieron individuos en floración y que tuvieran fruto pero que aún no estuvieran en la etapa de llenado de vainas. De esta forma, la medición de rasgos se realizó en el momento de máximo desarrollo vegetativo de la planta (Salgado-Negrete, 2015), permitiendo la comparación entre parcelas. Asimismo, los individuos elegidos se localizaban por lo menos a treinta centímetros de su vecino más cercano para asegurar que las raíces muestreadas correspondieran al individuo de interés.

Para la extracción de las plantas de frijol se marcó un cepellón de veinte centímetros de largo y ancho, y de una profundidad de treinta centímetros. Esto permitió extraer el sistema radical lo más completo posible. Se retiró el sustrato adherido a las raíces, recuperando también las raíces que quedaron en el material edáfico en el cepellón. La planta fue etiquetada y mantenida en refrigeración en bolsas de plástico hasta su procesamiento. Cabe mencionar que el procesamiento se realizó lo más pronto posible después del muestreo, usualmente el mismo día o unos pocos días después, con el fin de evitar la degradación y deshidratación de los tejidos.

En cada individuo se midieron 24 rasgos funcionales en hojas (7), tallo (4) y raíz (13). Los rasgos medidos reflejan procesos ecofisiológicos de la relación de la planta con el suelo de acuerdo con estudios previamente realizados (Comas y Eissenstat, 2004; Cortez et al., 2007; Comas, et al., 2013; Reich, 2014; Roumet et al., 2015). Por ello, estos rasgos representan características con potencial para ser usadas como indicadores de las condiciones edáficas. Las mediciones aquí realizadas fueron adaptadas de protocolos estandarizados existentes (Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; PrometeusWiki, 2013; Salgado-Negrete, 2015). Se presenta aquí información breve de cada rasgo.

i) Rasgos funcionales de hojas

De cada uno de los diez individuos colectados por parcela, se eligieron cinco hojas para medir grosor, peso fresco, área foliar, y peso seco, estas hojas debían presentar un completo desarrollo, sin presencia de herbivoría, de daños, ni de alteraciones de color, es decir, que se encontraran en estado visualmente óptimo. Además, se seleccionaron cinco individuos para colectar cinco hojas adicionales de cada uno, con las mismas condiciones que las mencionadas anteriormente, las cuales fueron lavadas, secadas, pesadas (en base seca) y molidas para realizar análisis químicos de la concentración de nitrógeno y fósforo. Algunas mediciones se realizaron inmediatamente después del muestreo (grosor, peso fresco), y otras en el laboratorio (área foliar, peso seco, nutrimentos), para lo cual las hojas fueron prensadas.

- Grosor foliar

El grosor de la hoja es un rasgo que tiene relación con el área foliar específica (SLA) y la resistencia de las hojas a condiciones ambientales adversas, como la escasez de agua (Silva, et al., 1999). En cada hoja, de las 5 colectadas por individuo, se midió el grosor en tres puntos

con un vernier digital, evitando las venas primarias o medias, los márgenes o la base de la hoja, y se calculó un promedio (modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negrete, 2015).

- **Área foliar específica**

El área foliar específica (Specific Leaf Area, SLA) es el cociente del área foliar y el peso seco de la hoja. Este rasgo cambia con las condiciones ambientales, jugando un papel importante el contenido de nitrógeno presente en el medio (Brück y Guo, 2006), por lo que puede ser un indicador potencial de estas condiciones. Para calcularlo, se utilizaron las cinco hojas de cada individuo prensadas en campo, que fueron secadas en estufas a una temperatura entre 40 y 50°C en un periodo de 48 a 72 horas hasta peso constante (Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negrete, 2015). Estas hojas fueron escaneadas con ayuda de un escáner Epson, y el área foliar calculada con el software WinFolia (Regent Instruments Inc.). Con el peso seco de la hoja, se calculó el SLA y se calculó un promedio por individuo con las cinco hojas. Los frijoles tienen hojas compuestas, es decir, con foliolos. Para calcular el SLA de la hoja completa se consideraron los tres foliolos, pero no el raquis.

- **Contenido de materia seca foliar**

El contenido de materia seca foliar (Leaf Dry Matter Content, LDMC) es el cociente entre el peso seco y el peso fresco de la hoja (Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negrete, 2015). El LDMC refleja estrechamente la estrategia de uso de recursos en una planta, es decir, si se trata de una planta con rápida asimilación y crecimiento o una planta con un uso conservador de recursos, ya que define los costos de producción de la planta en términos de biomasa (Garnier et al., 2001; Díaz et al., 2004). El peso fresco fue medido con una balanza analítica en las cinco hojas seleccionadas por individuo. Después de ser secadas, las hojas fueron pesadas en la misma balanza.

- **Densidad del tejido foliar**

La densidad del tejido foliar (Leaf Tissue Density, LTD) fue obtenida de la división del peso seco entre el volumen fresco de la hoja (Shipley y Vu, 2002). Este rasgo fue calculado en las cinco hojas a las que se les midió el grosor, área, peso fresco y seco. El volumen de la hoja se obtuvo como la multiplicación del área foliar (medida para el cálculo del SLA) por el grosor de la hoja.

- **Concentración de nitrógeno y fósforo en hojas**

La concentración de nutrimentos en los órganos de la planta está estrechamente asociado con las condiciones en las que se está desarrollando la planta (Wright, et al., 2001). Se estimó el contenido total de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las hojas de cinco de los 10 individuos seleccionados por parcela. Un valor alto en el contenido y concentración de N y P indica altas tasas fotosintéticas y altas tasas de crecimiento individual (Salgado-Negret, 2015). Las hojas seleccionadas para este análisis eran bien desarrolladas, con niveles mínimos de herbivoría, ataque de patógenos o daños visibles. Asimismo, las hojas se lavaron adecuadamente con agua acidulada, con ácido clorhídrico 0.1 N y enjuagada en agua destilada para eliminar

cualquier elemento contaminante. Las hojas fueron secadas a 60°C para evitar la volatilización de los elementos (modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015) y molidas sin peciolo. El material molido se envió al laboratorio de Análisis de Suelo del Colegio de Postgraduados para la cuantificación de N total a través del método de Kjeldahl (Kirk, 1950) y de P total a través del método de colorimetría azul de molibdeno (Fiske y Subarrow, 1925).

- **Biomasa de hojas**

La biomasa representa la cantidad de materia orgánica contenida en la planta y que puede acumularse a lo largo del tiempo. La biomasa se estima a partir del peso seco de las estructuras aéreas y subterráneas (Schlegel et al., 2000). En sistemas de cultivo, la biomasa aporta información importante sobre el rendimiento y productividad de los mismos (Fonseca, et al., 2009). Para estimar la biomasa de las hojas en las plantas de frijol, se separaron todas las hojas en un individuo (foliolos y peciolos) y se secaron en bolsas de papel a 80°C por 3 días o hasta peso constante. Posteriormente, el peso de las hojas de un individuo fue sumado, junto con cualquier otra hoja separada para alguna otra medición de rasgos foliares. A las hojas también se añadieron las flores, usualmente escasas, presentes en la planta.

ii) **Rasgos funcionales de tallo**

- **Altura de la planta**

La altura de la planta es la distancia entre el límite superior de los principales tejidos fotosintéticos de la planta y la superficie del suelo (Cornelissen, et al., 2003). La altura se asocia con el vigor competitivo, la fecundidad, y la tolerancia al estrés ambiental (clima, nutrimentos). Este rasgo se correlaciona con la biomasa aérea, la profundidad y extensión lateral de la raíz y el tamaño de la hoja, por lo que tiene gran potencial como indicador. La altura se midió sobre las diez plantas colectadas con un flexómetro como la distancia desde la base del tallo en contacto con el suelo hasta la punta del tallo o rama principal, sin considerar las inflorescencias, y siguiendo la curvatura del tallo principal.

- **Diámetro basal del tallo**

El diámetro del tallo tiene un papel importante en el soporte mecánico y en la eficiencia de transporte de agua (Bullock, 2000), y es un rasgo que tiene efecto en la función de todo el ecosistema. Existe una disyuntiva entre el crecimiento y la sobrevivencia que involucra a la altura; plantas que invierten menos en estructuras de soporte, crecerán más rápido, sin embargo, el soporte estructural será deficiente por lo que la planta puede doblarse con mayor facilidad (King, et al., 2006). El diámetro fue medido en las diez plantas en la porción cercana al suelo, por encima del sistema radical, es decir, donde se observaba la diferenciación entre el tallo y la parte subterránea de la planta, utilizando un vernier digital. Se obtuvieron dos mediciones perpendiculares entre sí, que fueron promediadas.

- **Densidad específica del tallo**

La densidad específica del tallo (SSD, Stem-Specific Density) es el cociente entre el peso seco y el volumen fresco de una sección de tallo (Salgado-Negrete, 2015). Este rasgo se relaciona con

la estabilidad estructural, la conductividad hidráulica, la defensa, la captura de carbono y el potencial de crecimiento en las plantas. Un tallo denso será más resistente, estructuralmente hablando, por lo que la planta se mantendrá de pie y será más longeva; asimismo, las plantas tendrán baja tasa de crecimiento debido a la estabilidad estructural e hidráulica y por la inversión de biomasa para la construcción de estructuras resistentes contra patógenos, herbívoros o daño físico por perturbaciones bióticas o abióticas; sucediendo lo contrario con plantas cuyo tallo es menos denso (Poorter et al., 2008; Pérez-Harguindeguy, et al., 2013). Para estimar este rasgo, se midió el volumen fresco de secciones basales de tallos de 2 cm de longitud, y que correspondían a la misma sección en la que se midió el diámetro basal. El volumen se estimó mediante el método de desplazamiento de agua (Salgado-Negret, 2015). Las muestras se secaron posteriormente en un horno a 60°C durante 5 días o a 80°C por 3 días hasta peso constante (modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015), para obtener el peso seco.

- **Biomasa de tallo**

Al igual que en el caso de las hojas, los tallos fueron separados de las hojas y las raíces para ser secados y pesados. La biomasa del tallo fue estimada sumando este peso seco con el de otros fragmentos de tallo colectados para la medición de otros rasgos (p.e. densidad específica), también los peciolos de las hojas fueron sumados como parte de este órgano.

iii) Rasgos funcionales de raíces

Se colectaron raíces de los 10 individuos seleccionados por parcela. Las raíces se lavaron con agua corriente para eliminar el suelo y se almacenaron en hieleras para que llegaran frescas hasta el laboratorio. Al llegar al laboratorio, se hizo un lavado de las raíces con agua acidulada 0.1 N y enjuagadas con agua destilada para eliminar sustrato restante y otros elementos que pudieran influir en la medición de nutrimentos. A partir de este punto, la manipulación de la raíz fue cuidadosa, utilizando guantes y evitando el contacto con algún elemento que pudiera contaminar la muestra. Una vez escaneada la imagen de las raíces, éstas fueron secadas en horno a 60°C por 5 días para obtener el peso seco y continuar con el análisis químico que se explicará más adelante.

- **Longitud radical específica**

La longitud radical específica (SLR, Specific Root Length) es la relación entre la longitud y el peso seco de las raíces finas (<2mm de diámetro). El SRL es análogo al área foliar específica (SLA), pues describe la cantidad de tejido absorbente construido (longitud raíz) por unidad de masa invertida. Las plantas con alto valor de SRL construyen raíces más largas por inversión de masa seca, pero el diámetro y densidad de éstas raíces suele ser bajo. Estas plantas con alta longitud radical específica también presentan tasas de elongación de raíz rápidas, tasas altas de absorción de nutrimentos y agua, rotación más rápida de la raíz, altas tasas de crecimiento, menor longevidad y una menor probabilidad de asociación con micorrizas, en comparación con plantas que presentan baja SRL. En contraste, las raíces que presentan mayor diámetro ejercen mayor fuerza de penetración en el suelo, tienen mejor resistencia a la baja humedad

del suelo y presentan mayores tasas de transporte de agua dentro del sistema radical. No obstante, para construir y conservar, estas raíces son más “costosas” por unidad de longitud (Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Salgado-Negret, 2015).

Para la estimación del SRL, se seleccionó una ramificación secundaria de la raíz. Esta raíz fue escaneada y la imagen analizada con el programa WinRhizo (2016, Regent Instruments Inc.). Este programa permitió obtener la longitud, área superficial y volumen por clases de diámetro (0-0.05, 0.5-1, 1-1.5, 1.5-2, 2-2.5, 2.5-3, 3-3.5, 3.5-4, 4-4.5, 4.5-5 mm). Estos datos formaron la base del cálculo del SRL y de otros rasgos que se explicarán más adelante. Posteriormente las raíces se secaron en un horno a 30-50°C por un periodo de 48 a 72 horas (modificado de Pérez-Harguindeguy, et al., 2013; Salgado-Negret, 2015). Las raíces finas fueron separadas del resto de la raíz para obtener su peso seco y el de la raíz completa. De esta manera, el SRL de las raíces finas fue calculado como la longitud de estas raíces entre su peso seco.

- **Densidad del tejido radical**

La densidad del tejido radical (RTD, Root Tissue Density) se obtiene de la división del peso seco radical entre su volumen fresco (PrometheusWiki, 2013). Altos valores de este rasgo se relacionan con mayor resistencia a la fragmentación, a afectaciones por herbívoros y sequía, así como a menores tasas de descomposición y a su vez, a mayor longevidad, sin embargo, se relaciona negativamente con la absorción de nutrientes (Fortunel et al., 2012; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; PrometheusWiki, 2013). Para calcular este rasgo se dividió el peso seco de las raíces finas entre su volumen. Este volumen fue calculado a partir de la imagen escaneada y el programa WinRhizo.

- **Contenido de materia seca radical**

El contenido radical de materia seca (RDMC, Root Dry Matter Content) representa el peso seco de las raíces finas dividida entre su peso fresco. Altos valores de este rasgo se relacionan positivamente con la densidad de los tejidos radicales, así como en la inversión de biomasa en estas estructuras, dando mayor defensa, aunque la tasa de descomposición es baja (Salgado-Negret, 2015). Al estar asociado con la estrategia de adquisición y uso de nutrientes, este rasgo tiene el potencial de reflejar condiciones ambientales. Para calcularlo, se trabajó con el sistema radical completo de los diez individuos por parcela, a los cuales se les midió el peso fresco y el seco.

- **Área superficial específica de la raíz**

El área superficial específica (SSA, Specific Surface Area) es el cociente del área de las raíces finas y su peso seco. Este rasgo representa la relación entre el área de adquisición y la inversión en recursos de carbono en la raíz (peso seco) (Himmelbauer, 2004; Comas, et al., 2013). Para calcular este rasgo, se calculó el área de las raíces finas (<2 mm) y se dividió entre el peso seco.

- **Longitud máxima de raíz**

La longitud de la raíz tiene un papel importante en la exploración de recursos sobre el suelo para la planta. Raíces profundas, con mayor longitud, permiten que las plantas que crecen en limitaciones en la disponibilidad de agua puedan explorar mayor superficie y asegurar mayor absorción de nutrimentos y agua, como vía de adaptación en ambientes poco favorecedores (Ho, et al., 2005, Polanía, et al., 2009). La longitud máxima de raíz fue estimada con ayuda de un flexómetro, midiendo la longitud de la raíz más larga del sistema radical completo.

- **Numero de verticilos**

El número de verticilos radiculares de las plantas se relaciona con la habilidad de formar raíces basales con diferentes ángulos. Esta característica permite que la planta pueda explorar más volumen de suelo, teniendo mayor oportunidad de absorber nutrimentos y agua, sobre todo en suelos con baja fertilidad (Departament of Plant Science, 2018). Esta variable fue determinada en los diez individuos extraídos, contabilizando el total de verticilos de las raíces basales en cada sistema radical.

- **Numero de raíces basales**

La cantidad de raíces basales puede ser útil para entender el comportamiento de la planta ante la disponibilidad de recursos en el suelo. El crecimiento de la raíz responde a la presión por falta de fósforo, por ejemplo, ya sea a través de la proliferación de raíces basales y su respuesta geotrópica (Lynch, et al., 1995). Las raíces basales se contabilizaron en conjunto con el número de verticilos en cada sistema radical.

- **Numero de raíces adventicias**

Las raíces adventicias se originan en un lugar diferente al sistema radical de la planta, como el tallo. Estas raíces pueden aparecer como respuesta a situaciones desfavorables de los suelos como exceso de agua, salinidad en el suelo, exceso o limitación de algún otro elemento, por lo que la planta debe explorar otros sitios del ambiente (Can, et al., 2014; De la Cruz, et al., 2012). Para determinar el número de raíces adventicias, se contaron aquellas originadas en el tallo, justo arriba del inicio del sistema radical.

- **Diámetro raíz principal**

El diámetro de la raíz es una medida que puede variar de acuerdo con las condiciones del suelo y las limitaciones del ambiente. En un suelo compactado el diámetro de las raíces es mayor para algunas especies, esto es porque la raíz desarrolla una mayor fuerza osmótica que permite una mejor adaptación al suelo compactado (León, et al., 1997). Esta variable fue medida inmediatamente después de haber extraído la planta de frijol, se localizó el eje principal del sistema radical y se midió su diámetro con ayuda de un vernier digital.

- **Densidad radical**

La densidad radical es una variable que relaciona el área de la superficie de raíz con la inversión de biomasa. Una mayor densidad radical contribuye a la absorción de nutrimentos

inmóviles del suelo, como el fósforo (Department of Plant Science, 2016). Este rasgo fue determinado en el sistema radical fresco, contabilizando las raíces finas de cinco centímetros de longitud de una de las raíces secundarias.

- **Biomasa de raíz**

Al igual que en el caso de las hojas y los tallos, las raíces fueron separadas de las hojas y los tallos para ser secadas y pesadas. La biomasa del sistema radical fue estimada sumando este peso seco con el de otros fragmentos de raíces colectados para la medición de otros rasgos (p.e. SRL).

- **Contenido de nitrógeno y fósforo en raíces**

Se siguió el mismo protocolo que para la medición de N y P en las hojas. De los mismos cinco individuos por parcela que se eligieron para el análisis de nutrientes en las hojas, se molió el sistema radical excepto la raíz principal, asegurando así la mayor proporción de raíces finas (<2 mm) en el polvo obtenido, ya que son las que absorben la mayor parte de los nutrientes.

▪ **Productividad en parcelas de frijol**

Para medir la productividad, se realizó una visita a las parcelas durante agosto para la zona de Guarapo y en septiembre de 2016 para la zona de La Quemada, cuando la planta de frijol se encontraba en la etapa final de crecimiento de las vainas y senescencia de las hojas, justo antes de la cosecha (CIAT, 1986). El protocolo para medir productividad se basó en protocolos estandarizados (Phenotyping Common Beans for Adaptation to Drought: Protocol for Field Evaluation, CIAT, 2012). Para ello, en cada parcela se definió un área de cosecha de aproximadamente tres metros de ancho (equivalentes a aproximadamente cuatro hileras del cultivo) por seis metros de largo. Dentro del área de cosecha se contabilizaron y colectaron todas las plantas, cortando al individuo desde el tallo al ras del suelo. Posteriormente, las plantas se almacenaron en bolsas de plástico, debidamente etiquetadas, para su transporte al laboratorio y posterior procesamiento. Las plantas fueron separadas en tallos, vainas y semillas. En caso de quedar algunas hojas, se juntaron con el resto del tallo, como parte de la biomasa aérea. Después se contaron y separaron el número de vainas y de semillas y, al igual que el tallo, se secaron los tres componentes de la planta en una estufa de secado a 60°C durante dos días para eliminar la humedad.

Posteriormente, se pesó cada componente (tallos, vainas y semillas) en una balanza analítica. Así, se obtuvo el número de vainas y número de semillas por área, así como la biomasa del tallo, vainas y semillas, variables que permitieron calcular los siguientes índices de productividad: eficiencia de producción de semillas, eficiencia de producción de vainas, índice de cosecha, índice de cosecha de vainas y el índice de partición de vainas. Enseguida se enlistan las formulas correspondientes:

○ *Eficiencia de producción de semillas (# semillas g⁻¹):*

$$\text{Eficiencia de producción de semillas} = \frac{\text{número de semillas por área}}{\text{biomasa seca total de tallos}}$$

- *Eficiencia de producción de vainas (#vainas g⁻¹)*

$$\text{Eficiencia de producción de vainas} = \frac{\text{número de vainas por área}}{\text{biomasa seca total de tallos}}$$

- *Índice de cosecha (HI) (%)*:

$$\text{HI} = \frac{\text{biomasa seca de semillas}}{\text{biomasa seca total de tallos}} \times 100$$

- *Índice de cosecha de vainas (PHI) (%)*:

$$\text{PHI} = \frac{\text{biomasa seca de semillas}}{\text{biomasa seca de vainas}} \times 100$$

- *Índice de partición de vainas (%)*:

$$\text{Índice de partición} = \frac{\text{biomasa seca de vainas}}{\text{biomasa seca total de tallos}} \times 100$$

▪ **Análisis estadístico**

En esta sección se explican las pruebas aplicadas para el análisis de los datos de acuerdo a los objetivos planteados en este trabajo. Para describir y conocer las relaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Este análisis permitió reducir la dimensión de los datos y detectar aquellas variables que covariaron entre sí y que tuvieron mayor influencia en la caracterización de los suelos. Además de este análisis se calculó la correlación de Pearson entre las variables de suelo para conocer la fuerza y dirección de la relación entre ellas. De esta forma se obtuvo una caracterización general de la condición de los suelos de las diferentes parcelas de estudio y con ello se logró diferenciar la zona Norte y Sur de Guanajuato.

El siguiente paso fue entender la respuesta de las plantas ante las diferentes condiciones edáficas existentes en las parcelas de estudio. Para conocer la relación entre los rasgos funcionales determinados en las plantas y las propiedades físicas y químicas del suelo, se realizaron correlaciones entre las variables. Éstas sirvieron para detectar los rasgos del frijol con mayor potencial como indicadores de la calidad de suelo. Cabe mencionar que antes de calcular estas correlaciones, se determinó la influencia de la densidad de siembra en la expresión de las características de las plantas. Para ello, se estimó la correlación de la densidad de siembra con los rasgos funcionales medidos en las plantas. Así se identificaron rasgos cuya expresión fue afectada por la cantidad de individuos sembrados por unidad de área, principalmente como resultado de la competencia por espacio y recursos. Para determinar la relación de estos rasgos con las variables edáficas se calculó una correlación parcial, controlada por una tercera variable que fue la densidad de siembra.

La productividad de un agroecosistema de frijol suele determinarse mediante diversas variables, en este trabajo se tomaron en cuenta las variables mencionadas en la sección anterior como son, la eficiencia de producción de semilla, eficiencia de producción de vaina, índice de cosecha, índice de cosecha de vainas e índice de partición de vainas. Con el objetivo de entender los patrones de

variación de estas variables, se realizó un análisis de componentes principales (PCA), mismo que permitió diferenciar a las parcelas por zonas. Para complementar dicho análisis, se obtuvo el valor de las correlaciones entre las variables de productividad.

Asimismo, la productividad del cultivo es un elemento que puede ser afectado por las condiciones edáficas. Por lo cual, se calcularon correlaciones de las variables edáficas con las variables de productividad para conocer si existía algún tipo de relación entre ellas.

La productividad un elemento del cultivo que puede ser afectado por diversas condiciones ambientales, como son las edáficas. Por ello, se estimaron las correlaciones de las variables edáficas físicas y químicas con las variables de productividad, con el fin de conocer si existía algún tipo de relación entre ellas.

Los análisis descritos se llevaron a cabo con los datos promedio por parcela (n=9) de cada una de las variables edáficas, de rasgos funcionales y de productividad. Los promedios para cada variable se calcularon con los datos de los diez individuos por parcela, y fue con dichos promedios que se realizaron los análisis aquí descritos entre las diferentes variables. En el Anexo 1 se encuentran los datos de los promedios para las variables de suelo, de rasgos funcionales y de productividad para cada individuo y parcela. Todos los análisis se realizaron con R v.3.2.5 (R Core Team, 2016).

VI. RESULTADOS

i) Variables edáficas en las parcelas de frijol

El análisis de componentes principales (PCA) realizado con las variables físicas y químicas del suelo mostró fuertes patrones de covariación. Los primeros dos componentes principales (PC) explicaron, aproximadamente, el 88% de la variabilidad en las variables del suelo (Cuadro 6). Para el PC1 las variables que presentaron mayor carga fueron el porcentaje de arcilla y arena, dependiente una de otra, la conductividad eléctrica (C.E.), la capacidad máxima de retención de agua (CMRA), la concentración de carbono total (C) y la densidad aparente (D.A.). En el PC2 las variables con mayores cargas fueron la concentración y la cantidad de nitrógeno (N) y fósforo (P), el pH y el porcentaje de limo (Cuadro 7).

Cuadro 6. Varianza explicada por los componentes 1 y 2 del PCA con las variables de suelo

	PC 1	PC 2
Desviación estándar	3.106	1.645
Proporción de la varianza explicada	0.689	0.193
Proporción acumulada de la varianza explicada	0.689	0.882

Cuadro 7. Valores de cargas de las variables edáficas para los dos primeros componentes principales. Se resaltan en negritas las cargas altas para cada componente.

	PC1	PC2
Arcilla	-0.317	-0.032
Capacidad Máxima de Retención de Agua (%)	-0.315	0.012
Arena	0.311	0.011
Conductividad eléctrica	-0.311	0.102
Limo	0.302	0.101
Capacidad Máxima de Retención de Agua (L/m ²)	-0.301	-0.016
Densidad aparente	0.299	0.096
Carbono total (%)	-0.292	0.223
pH	-0.22	-0.166
Nitrógeno (Kg/m ²)	-0.037	0.58
Fósforo (ppm)	0.204	0.41
Fósforo (g/m ²)	0.215	0.39
Carbono total(kg/m ²)	-0.222	0.385
Nitrógeno (%)	-0.25	0.294

Cabe mencionar que algunas variables como el pH, el nitrógeno o la capacidad máxima de retención de agua, tuvieron un peso mayor (y por tanto una correlación mayor) con respecto al tercer componente principal y otros sucesivos. Sin embargo, estos componentes explicaron una proporción baja de la variación, por lo que no se tomaron en cuenta.

El gráfico del PCA (Figura 3) muestra que la relación entre el pH, la CMRA y la C.E., es positiva, teniendo pesos altos y positivos en el PC1. Por su parte, la densidad aparente, la cantidad y la concentración de fósforo, y el porcentaje de limo y arena, marcan una dirección común (correlación positiva entre ellas) dentro del mismo PC1, pero negativa con el grupo de variables descrito con anterioridad. En cuanto al PC2, todas las variables con altas cargas (cantidad de nitrógeno, porcentaje y concentración de fósforo, y cantidad de carbono total) se asociaron positivamente entre sí (Cuadro 7, Figura 3). La Figura 3 y los patrones de correlación que resume sugieren que es posible asociar al PC1 principalmente con las variables físicas y al PC2 con las variables químicas.

De acuerdo con la Figura 3 y los valores de las cargas de las variables (Cuadro 7), se observa que el PC1 separa suelos de fertilidad contrastante. Por un lado, están aquellos con mayor valor de arcilla, conductividad eléctrica, pH, CMRA y nitrógeno. Suelos con estas características tienden a contener un bajo porcentaje de limo y arena, una baja densidad aparente y baja concentración de

fósforo. Esta fertilidad indicada por el PC1 combinada con el PC2 marcó una muy clara separación entre las parcelas por zona geográfica. Las parcelas de La Quemada (círculos en Figura 3), se encontraron en el lado derecho de la gráfica, indicando que además de ser suelos con texturas limo-arcillosas a arena arcillosas, tienen una mayor concentración de fósforo y densidad aparente, así como una menor capacidad de retención de agua, concentración de carbono, conductividad eléctrica y pH. Las parcelas de Guarapo tendieron a agruparse hacia el lado izquierdo del gráfico (triángulos), indicando una mejor calidad de suelo para el crecimiento de plantas de frijol. Los suelos de La Quemada, localizados en una zona árida, parecen menos propicios para la agricultura que los de Guarapo, zona más húmeda y con influencia volcánica.

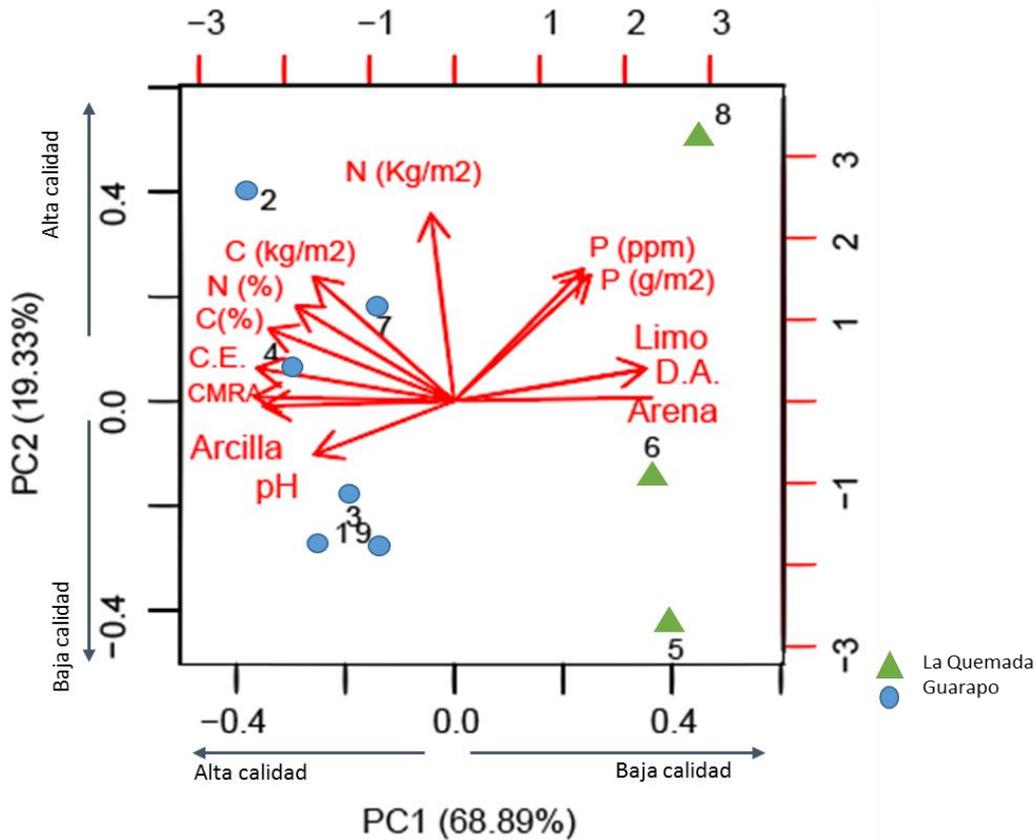


Figura 3. Gráfica del análisis de componentes principales de las variables de suelo.

Para complementar los análisis de PCA, se analizaron las asociaciones entre pares de variables edáficas (Cuadro 8). Confirmando lo descrito en el PCA, los suelos arcillosos se asociaron con valores altos de pH, conductividad eléctrica, capacidad máxima de retención de agua, concentración de nitrógeno, y de carbono total. Por el contrario, los valores fueron bajos con respecto a la concentración de fósforo. Cabe resaltar que la mayoría de estas correlaciones fueron altas, sobre todo en el grupo de variables que incluye al porcentaje de partículas minerales, el pH, la C.E., la D.A., la CMRA, y la materia orgánica. El resto de los nutrientes tuvieron relaciones significativas, pero menos fuertes.

Cuadro 8. Correlación de Pearson entre variables edáficas. Se resaltan con un sombreado aquellas significativas a un nivel alfa = 0.05.

	Arcilla	Limo	Arena	pH	C.E.	D.A.	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N (%)	N (Kg/m ²)	P (ppm)	P (g/m ²)	C _{total} (%)	C _{total} (g/m ²)	pc1 suelo	pc2 suelo
Arcilla	1	- 0.911*	- 0.993*	0.679*	0.934*	- 0.885*	0.986*	0.943*	0.697*	0.047	- 0.649*	- 0.682*	0.865*	0.678*	- 0.985*	-0.052
Limo	- 0.911*	1	0.858*	- 0.751*	- 0.898*	0.907*	- 0.899*	- 0.853*	- 0.688*	0.004	0.696*	0.729*	- 0.767*	-0.486	0.939*	0.166
Arena	- 0.993*	0.858*	1	-0.638	- 0.915*	0.851*	- 0.979*	- 0.938*	- 0.678*	-0.06	0.616	0.647	- 0.865*	-0.71*	0.967*	0.019
pH	0.679*	- 0.751*	-0.638	1	0.61	-0.77*	0.653*	0.565	0.519	-0.219	-0.424	-0.427	0.492	0.103	- 0.684*	-0.272
C.E.	0.934*	- 0.898*	- 0.915*	0.61	1	- 0.888*	0.966*	0.916*	0.819*	0.251	-0.469	-0.513	0.93*	0.756*	- 0.967*	0.168
D.A.	- 0.885*	0.907*	0.851*	-0.77*	- 0.888*	1	- 0.875*	- 0.844*	- 0.707*	0.067	0.65*	0.674*	- 0.808*	-0.476	0.93*	0.159
CMRA (%)	0.986*	- 0.899*	- 0.979*	0.653*	0.966*	- 0.875*	1	0.964*	0.704*	0.097	-0.566	-0.605	0.871*	0.709*	- 0.978*	0.02
CMRA (L/m²)	0.943*	- 0.853*	- 0.938*	0.565	0.916*	- 0.844*	0.964*	1	0.58	0.058	-0.579	-0.62	0.791*	0.692*	- 0.934*	-0.026

Continuación Cuadro 8. Correlación de Pearson entre variables edáficas. Se resaltan con un sombreado aquellas significativas a un nivel alfa = 0.05.

	Arcilla	Limo	Arena	pH	C.E.	D.A.	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N (%)	N (Kg/m ²)	P (ppm)	P (g/m ²)	C _{total} (%)	C _{total} (g/m ²)	pc1 suelo	pc2 suelo
N (%)	0.697*	- 0.688*	- 0.678*	0.519	0.819*	- 0.707*	0.704*	0.58	1	0.584	-0.185	-0.214	0.929*	0.741*	- 0.776*	0.484
N (Kg/m²)	0.047	0.004	-0.06	-0.219	0.251	0.067	0.097	0.058	0.584	1	0.501	0.466	0.449	0.683*	-0.114	0.954*
P (ppm)	- 0.649*	0.696*	0.616	-0.424	-0.469	0.65*	-0.566	-0.579	-0.185	0.501	1	0.998*	-0.362	-0.08	0.632*	0.674*
P (g/m²)	- 0.682*	0.729*	0.647	-0.427	-0.513	0.674*	-0.605	-0.62	-0.214	0.466	0.998*	1	-0.399	-0.129	0.667*	0.642*
C_{total} (%)	0.865*	- 0.767*	- 0.865*	0.492	0.93*	- 0.808*	0.871*	0.791*	0.929*	0.449	-0.362	-0.399	1	0.861*	- 0.908*	0.367
C_{total} (g/m²)	0.678*	-0.486	-0.71*	0.103	0.756*	-0.476	0.709*	0.692*	0.741*	0.683*	-0.08	-0.129	0.861*	1	-0.69*	0.634

ii) Relación entre variables de suelo y rasgos funcionales de la planta de frijol

Diversas variables edáficas estuvieron estrechamente relacionadas con los rasgos funcionales del frijol, sugiriendo que las variables de suelo tienen un fuerte efecto sobre la expresión de las características de las plantas. Estos resultados también sugieren que existen características de las plantas con potencial para ser empleadas como indicadores de calidad de suelo.

Debido a que las correlaciones entre las variables del suelo y los rasgos funcionales podrían variar en función de la densidad de siembra (número de individuos por superficie), se examinó primero la correlación entre la densidad y los rasgos funcionales. La densidad de siembra presentó correlaciones significativas con el porcentaje de inversión de biomasa en hojas y tallos, con la longitud máxima de la raíz y el número de verticilos (Cuadro 9). Para estos rasgos, se calcularon correlaciones parciales entre el rasgo y las variables de suelo controlando por la densidad de siembra. Estas correlaciones parciales se muestran en la Cuadro 9, al igual que las que se derivan de correlaciones de Pearson tradicionales.

Cuadro 9. Correlación de rasgos funcionales y densidad de siembra con significancia (alfa=0.05).

	Densidad de siembra (ind. /m ²)	Interpretación
Longitud máxima de raíz	-0.712	Al haber mayor cantidad de individuos por unidad área, la longitud máxima de la raíz disminuye, o viceversa
Número de verticilos	0.958	A mayor número de individuos por unidad de área, mayor número de verticilos desarrollará el sistema radical de la planta de frijol o viceversa
Porcentaje inversión de biomasa en hojas	0.836	A mayor densidad de siembra, mayor biomasa respecto a la total se invertirá en las hojas de la planta, o viceversa
Porcentaje inversión de biomasa en tallos	-0.831	A mayor densidad de siembra, menor porcentaje de biomasa será invertido en el tallo de la planta respecto a la total, o viceversa

Las correlaciones mostraron diversas asociaciones entre rasgos funcionales y las variables edáficas. En general, variables como la textura, la conductividad eléctrica, la densidad aparente, la capacidad de retención máxima de agua y el carbono orgánico total del suelo se asociaron con rasgos funcionales de hojas, tallo y raíz (Cuadro 10).

Cuadro 10. Correlación entre las variables de suelo y los rasgos funcionales de plantas. En negritas se resaltan las correlaciones con $r \geq 0.5$ y con sombreado todas las correlaciones significativas, ya sea a un nivel $\alpha = 0.05$ (*) o $\alpha \leq 0.01$ (**).

	Arcilla	Limo	Arena	pH prom	C.E. prom	D.A. prom	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N prom (%)	N suma (kg)	P prom (ppm)	P suma (g)	Ct prom (%)	Ct suma (kg)	pc1 suelo	pc2 suelo
Grosor	- 0.916 **	0.795 *	0.916 **	- 0.258	- 0.751 *	0.65*	- 0.753 *	- 0.88* *	- 0.416	- 0.191	0.319	0.367	- 0.629 *	- 0.676 *	0.704 *	-0.144
Nitrógeno hojas	- 0.161	0.011	0.196	0.586	0.183	- 0.329	0.158	0.126	0.009	- 0.379	0.096	0.094	-0.045	-0.32	-0.109	-0.248
Fósforo hojas	- 0.846 **	0.891 **	0.803 **	- 0.411	- 0.826 **	0.848 **	- 0.807 **	- 0.812 **	- 0.505	0.116	0.735*	0.771 *	- 0.702 *	- 0.498	0.837 **	0.218
Altura planta	0.617 ns	- 0.465	- 0.636 ns	0.133	0.422	- 0.377	0.516	0.713 *	- 0.049	- 0.107	-0.302	-0.34	0.222	0.371	-0.428	-0.133
Diámetro tallo	- 0.491	0.513	0.468	- 0.675 *	- 0.691 *	0.65*	- 0.638 ns	- 0.494	- 0.642 ns	- 0.018	0.211	0.223	-0.596	- 0.258	0.621	-0.042
Nitrógeno raíz	- 0.324	0.365	0.301	0.319	- 0.034	0.048	- 0.076	- 0.185	0.158	0.078	0.478	0.497	-0.034	- 0.188	0.125	0.228
Fósforo raíz	- 0.81* *	0.778 *	0.79*	- 0.238	- 0.79*	0.737 *	- 0.784 *	- 0.843 **	-0.4	0.069	0.62	0.661 *	-0.643	-0.55	0.762 *	0.13
Longitud máxima raíz	0.411	-0.52	0.037	0.076	0.45	-0.15	0.46	0.44	0.25	0.18	-0.28	-0.32	0.27	0.36	-0.38	-0.02

Continuación Cuadro 10. Correlación entre las variables de suelo y los rasgos funcionales de plantas. En negritas se resaltan las correlaciones con $r \geq 0.5$ y con sombreado todas las correlaciones significativas, ya sea a un nivel $\alpha=0.05$ (*) o $\alpha=0.01$ (**).

	Arcilla	Limo	Arena	pH prom	C.E. prom	D.A. prom	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N prom (%)	N suma (kg)	P prom (ppm)	P suma (g)	Ct prom (%)	Ct suma (kg)	pc1 suelo	pc2 suelo
Biomasa brazo	-0.604	0.269	0.673	-0.515	-0.405	0.489	-0.581	-0.531	-0.263	0.272	0.506	0.493	-0.454	-0.31	0.561	0.255
Núm. verticilos	0.08	-0.13	-0.06	0.48	-0.21	-0.16	-0.04	0.05	-0.42	-0.68	-0.49	-0.45	-0.32	-0.57	0.03	0.75*
Núm. raíces basales	0.617	-0.451	-0.64	0.01	0.26	-0.281	0.322	0.381	0.279	0.236	-0.365	-0.377	0.432	0.547	-0.394	0.109
Núm. raíces adv.	-0.202	0.256	0.181	-0.405	0.041	0.274	-0.039	-0.021	-0.087	0.27	0.469	0.44	-0.066	0.151	0.178	0.406
Diámetro raíz principal	-0.91*	0.785*	0.912**	-0.245	-0.744*	0.578	-0.669*	-0.523	-0.858**	-0.468	0.305	0.331	-0.896**	-0.78*	0.718*	-0.403
Densidad radical	0.521	-0.401	-0.534	0.583	0.697*	-0.606	0.622	0.529	0.738*	0.373	0.147	0.121	0.713*	0.56	-0.592	0.464
densidad_m2	0.49	-0.378	-0.513	0.443	0.276	-0.239	0.298	0.085	0.586	0.242	-0.206	-0.192	0.474	0.32	-0.37	0.155
Densidad promedio individuo	-0.569	0.314	0.617	-0.593	-0.634	0.487	-0.69*	-0.564	-0.545	-0.081	0.142	0.153	-0.592	-0.432	0.609	-0.141

Continuación Cuadro 10. Correlación entre las variables de suelo y los rasgos funcionales de plantas. En negritas se resaltan las correlaciones con $r \geq 0.5$ y con sombreado todas las correlaciones significativas, ya sea a un nivel $\alpha = 0.05$ (*) o $\alpha = 0.01$ (**).

	Arcilla	Limo	Arena	pH prom	C.E. prom	D.A. prom	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N prom (%)	N suma (kg)	P prom (ppm)	P suma (g)	Ct prom (%)	Ct suma (kg)	pc1 suelo	pc2 suelo
Biomasa raíces individuo total	-0.73	0.674	0.719	0.765*	0.796*	0.8**	0.793*	0.665*	0.707*	0.041	0.434	0.444	0.733*	-0.378	0.794*	0.053
Biomasa tallos individuo total	-0.278	0.273	0.269	-0.596	-0.434	0.447	-0.399	-0.212	-0.544	0.039	0.153	0.141	-0.429	-0.06	0.41	0.007
Biomasa hojas individuo total	-0.507	0.506	0.489	-0.62	0.679*	0.617	-0.623	-0.461	0.681*	-0.072	0.22	0.23	-0.627	-0.298	0.616	-0.086
SLA	0.76*	-0.513	0.8**	0.641	0.552	-0.633	0.71*	0.653*	0.402	-0.233	0.655*	0.649*	0.569	0.366	0.716*	-0.29
LTD	0.301	-0.363	-0.274	-0.082	0.425	-0.211	0.33	0.463	0.183	0.382	0.188	0.133	0.262	0.448	-0.249	0.387
LDMC	-0.338	0.111	0.387	-0.599	-0.154	0.292	-0.303	-0.154	-0.125	0.41	0.362	0.339	-0.178	0.065	0.308	0.379
Porcentaje inversión biomasa hojas	-0.19	0.36	0.14	0.18	-0.44	0.17	-0.25	-0.23	-0.65	0.75*	-0.09	-0.04	-0.5	-0.68	0.34	0.58
Porcentaje inversión biomasa tallos	0.42	-0.59	-0.36	0.07	0.61	-0.44	0.45	0.45	0.77*	0.63	-0.14	-0.19	0.66	0.73	-0.56	-0.4

Continuación Cuadro 10. Correlación entre las variables de suelo y los rasgos funcionales de plantas. En negritas se resaltan las correlaciones con $r \geq 0.5$ y con sombreado todas las correlaciones significativas, ya sea a un nivel alfa=0.05 (*) o alfa=0.01 (**).

	Arcilla	Limo	Arena	pH prom	C.E. prom	D.A. prom	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)	N prom (%)	N suma (kg)	P prom (ppm)	P suma (g)	Ct prom (%)	Ct suma (kg)	pc1 suelo	pc2 suelo
Porcentaje inversión biomasa raíces	- 0.767 *	0.755 *	0.743 *	- 0.455	- 0.538	0.741 *	- 0.601	- 0.729 *	- 0.256	0.218	0.667 *	0.684 *	-0.46	- 0.325	0.656 *	0.335
Densidad tallos	- 0.046	- 0.091	0.082	- 0.116	- 0.006	- 0.162	- 0.134	- 0.116	- 0.093	- 0.255	0.043	0.04	- 0.067	- 0.213	0.105	- 0.133
SRL brazo	- 0.502	0.794 *	0.404	- 0.481	- 0.425	0.648 *	- 0.389	- 0.512	- 0.271	0.144	0.504	0.515	- 0.281	- 0.041	0.476	0.31
RTD raíz total	0.847 **	- 0.552	- 0.897 **	0.559	0.724 *	- 0.62 *	0.844 **	0.788 *	0.56	0.072	- 0.472	- 0.488	0.73 *	0.643	- 0.801 **	0.031
RDMC raíz completa	- 0.529	0.182	0.605	- 0.322	-0.58	0.356	- 0.636	- 0.522	- 0.437	-0.15	0.002	0.024	-0.58	- 0.577	0.519	- 0.287
SSA	-0.34	0.583	0.262	- 0.662 *	- 0.374	0.605	- 0.339	- 0.384	- 0.401	0.063	0.352	0.348	- 0.294	0.029	0.435	0.21

De acuerdo con la Cuadro 10, el porcentaje de arcilla, la C.E., la CMRA y el carbono orgánico total se relacionaron negativamente con el grosor de la hoja, la concentración de fósforo foliar y radical, el diámetro de la raíz principal y con el porcentaje de inversión de biomasa en el sistema radical. Por el contrario, con rasgos como el área foliar específica (SLA), la densidad del tejido radical (RTD) y en menor medida con la altura de la planta, existió una correlación positiva. En contraste, el porcentaje de arena, la D.A. y, en algunos casos, el fósforo del suelo se relacionó positivamente con el grosor y concentración de fósforo de las hojas, el fósforo de la raíz, el diámetro de la raíz principal, el porcentaje de inversión de biomasa en raíces, y la longitud específica de la raíz, mientras que con el área foliar específica (SLA) y el área superficial específica de la raíz (SSA) se relacionaron de forma negativa.

El PC1 correspondiente al PCA de las variables edáficas (Figura 3), en el que se concentraron mayormente las variables físicas y químicas como el porcentaje de arcilla y arena, la C.E., la CMRA, el carbono orgánico total (%) y la D.A., se asoció positivamente con el grosor de la hoja, la concentración de fósforo en hojas y raíz, el diámetro de la raíz principal y el porcentaje de biomasa invertida en raíces. La relación fue negativa con rasgos como el área foliar específica y la densidad del tejido radical.

En cuanto a los nutrimentos, se obtuvo una relación positiva entre el fósforo del suelo y el de las hojas y la raíz. De igual forma, la biomasa en raíces aumentó conforme se incrementó el P del suelo. Por el contrario, a mayor concentración de fósforo en el suelo, se tuvo una menor área foliar específica. En cuanto al carbono orgánico total, al aumentar su concentración en el suelo, las plantas presentaron menor grosor y menor concentración de fósforo foliar, así como menor diámetro de la raíz principal. Al incrementarse la cantidad de C edáfico (i.e., en términos de volumen), las plantas presentaron menor biomasa total de raíces, así como mayor densidad del tejido radical. En lo que respecta al nitrógeno, conforme aumentó la cantidad (kg/m^2) de este nutrimento en el suelo, el diámetro de la raíz principal tendió a disminuir y la densidad radical a aumentar. De igual forma, la concentración (%) de nitrógeno en el suelo se asoció de forma positiva y significativa con la biomasa invertida en los tallos. En contraste, la concentración de nitrógeno del suelo se asoció de forma negativa, pero no significativa, con la inversión de biomasa en hojas.

Por último, respecto al PC2 de suelo, cuyas variables con mayor carga son las variables químicas, presentó asociación positiva con el número de verticilos. Así, a una mayor concentración de elementos como nitrógeno, fósforo y carbono en el suelo, mayor habilidad tendrán las plantas para formar estos verticilos.

VARIABLES EDÁFICAS COMO EL PORCENTAJE DE ARCILLA, LA C.E., LA CMRA Y EL C_t DEL SUELO, EN GENERAL, SE ASOCIARON POSITIVAMENTE CON EL TAMAÑO DE LAS HOJAS DE LA PLANTA Y LA ALTURA DEL INDIVIDUO. SIN EMBARGO, PRESENTARON UNA RELACIÓN NEGATIVA CON EL GROSOR DE LA HOJA Y LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIMENTOS EN ESTE ÓRGANO, SOBRE TODO DE FÓSFORO, ASÍ COMO CON EL DIÁMETRO DEL TALLO. EN CUANTO A LA RAÍZ, LOS SUELOS ARCILLOSOS PRESENTARON ASOCIACIÓN NEGATIVA CON EL DIÁMETRO DEL EJE PRINCIPAL, LA BIOMASA TOTAL Y EL PORCENTAJE DE INVERSIÓN DE LA BIOMASA EN RAÍCES RESPECTO A LA TOTAL, ASÍ COMO LA

cantidad de materia seca radical, mientras que se obtuvo una relación positiva con la densidad del tejido radical, al igual que la concentración de fósforo en este órgano subterráneo.

Lo contrario sucedió cuando existe un mayor porcentaje de arena en el suelo, pues se presentaron asociaciones negativas con el área y densidad del tejido foliar, así como con la altura de la planta, con la densidad del tejido radical y con el área superficial de la raíz. Asociaciones positivas se obtuvieron con el grosor y la concentración de fósforo foliar, así como en rasgos relacionados con la raíz como la biomasa total, la cantidad de materia seca radical, la concentración de fósforo, el diámetro de la raíz principal y la longitud radical específica.

Cabe destacar que se obtuvieron algunas relaciones más fuertes que otras entre variables del suelo y rasgos funcionales de los cultivos de frijol. Dentro de las correlaciones con alto valor, se encuentra el grosor de la hoja con la textura del suelo (negativa con una textura arcillosa y positiva para una textura arenosa), y la CMRA (relación negativa); la concentración de fósforo en las hojas con el porcentaje de arcillas y arena (negativa y positiva, respectivamente), la C.E. (negativa), la D.A. (positiva), la CMRA (negativa) y el PC1 de suelo (positiva); el área foliar específica con el porcentaje de arena del suelo (negativa). Asimismo, rasgos funcionales calculados en el sistema radical como la concentración de fósforo en la raíz tuvo una fuerte asociación con el porcentaje de arcilla (negativa) y la CMRA del suelo (negativa); el diámetro de la raíz principal se asoció fuertemente con el porcentaje de arcilla y arena (negativa y positiva, respectivamente), con la concentración de nitrógeno (negativa) y el carbono del suelo (negativa); la biomasa total de raíces se asoció con la densidad aparente del suelo (positiva); la densidad del tejido radical con la textura del suelo (negativa), la CMRA (positiva) y el PC1 del suelo (negativa). Por su parte, los rasgos funcionales medidos en el tallo no presentaron valores altos en las relaciones con variables edáficas. En las siguientes Figuras se muestran algunas de las correlaciones más fuertes entre rasgos funcionales y variables edáficas.

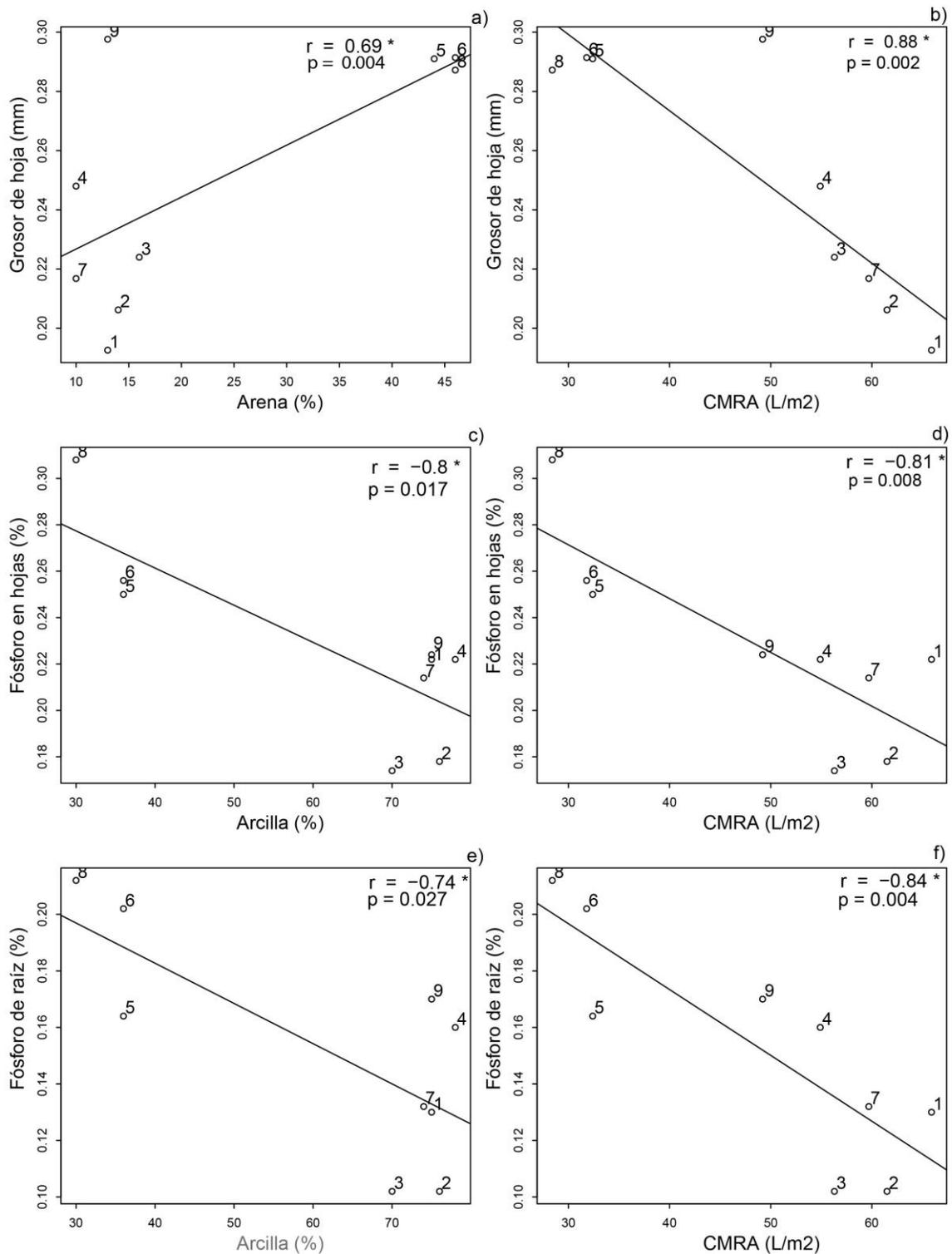


Figura 4. Gráfica de correlación de rasgos funcionales y variables edáficas. a) grosor de hoja vs. Porcentaje de arena del suelo, b) Grosor vs. Capacidad Máxima de Retención de Agua (CMRA), c) concentración de fósforo en hoja vs. Porcentaje de arcilla, d) concentración de fósforo vs. Capacidad máxima de retención de agua, e) concentración de fósforo en raíz vs. Porcentaje de arcilla, f) Concentración de fósforo radical vs. Capacidad máxima de retención de agua.

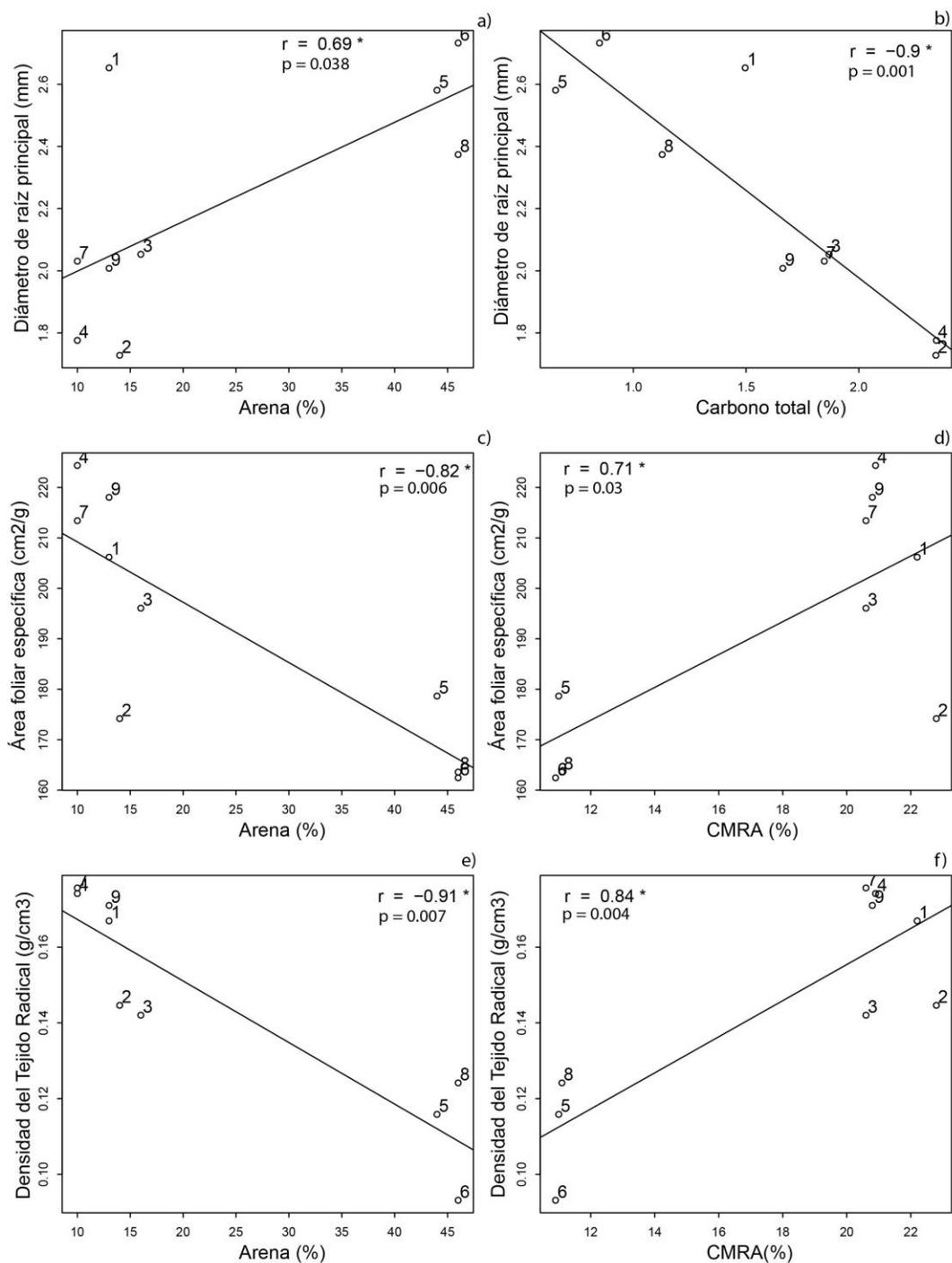


Figura 5. Gráfica de correlación de rasgos funcionales y variables edáficas. a) Diámetro de la raíz principal vs. Porcentaje de arena del suelo, b) Diámetro de raíz principal vs. Concentración del carbono total del suelo, c) área foliar específica (SLA) vs. Porcentaje de arena, d) SLA vs. Capacidad máxima de retención de agua en el suelo, e) Densidad del tejido radical (RTD) vs. Porcentaje de arena del suelo, f) RTD vs. Capacidad máxima de retención de agua en el suelo.

iii) Variables de productividad en las parcelas de frijol

El análisis de componentes principales sobre las variables de productividad indicó que los primeros dos componentes (PC) explicaron el 82% (Cuadro 11) de la variación observada. En el PC1 las variables con mayor carga fueron el índice de cosecha, el índice de cosecha de vainas y el índice de partición de vainas, mientras que para el PC2 resultaron importantes la eficiencia de producción de semilla y la eficiencia de producción de vainas (Cuadro 12). Esto agrupa para el PC1 las variables relacionadas con la biomasa de los componentes reproductivos del cultivo, y para el PC2 a las variables que reflejan el número de unidades de estos componentes.

Cuadro 11. Varianza explicada por los componentes 1 y 2 del PCA con variables de productividad.

	PC1	PC2
Desviación estándar	1.734	1.054
Proporción de la varianza	0.6014	0.2226
Proporción acumulada	0.6014	0.8239

Cuadro 12. Valores de cargas de las variables de productividad para los dos primeros componentes principales. Se resaltan las cargas altas para cada componente.

	PC1	PC2
Eficiencia producción de semilla	-0.20	0.679
Eficiencia de producción de vainas	0.30	-0.622
Índice de cosecha	-0.559	-0.223
Índice de cosecha de vainas	-0.543	-0.072
Índice de partición de vainas	-0.511	-0.311

En la Figura 6 se pueden observar de forma resumida los patrones de covariación entre las variables de biomasa y número de unidades reproductivas de la planta. Las variables de biomasa se agrupan todas hacia una dirección, mostrando relación positiva entre ellas y un alto valor de correlación. En cuanto a las variables de cantidad numérica, se observan direcciones opuestas sugiriendo una relación negativa ($r = -0.33$, $p > 0.05$, Cuadro 13). Esto indica que plantas que invirtieron mayor biomasa en vainas, también lo hicieron en biomasa de semillas. Por otra parte, plantas que produjeron mayor número de vainas tuvieron menor número de semillas producidas.

A diferencia de lo observado con las variables edáficas, las parcelas de la zona norte y sur no se diferenciaron en cuanto a su productividad (Figura 6). Las parcelas de ambos sitios se encontraron dispersas sugiriendo que hay sitios de alta y baja productividad en las dos localidades.

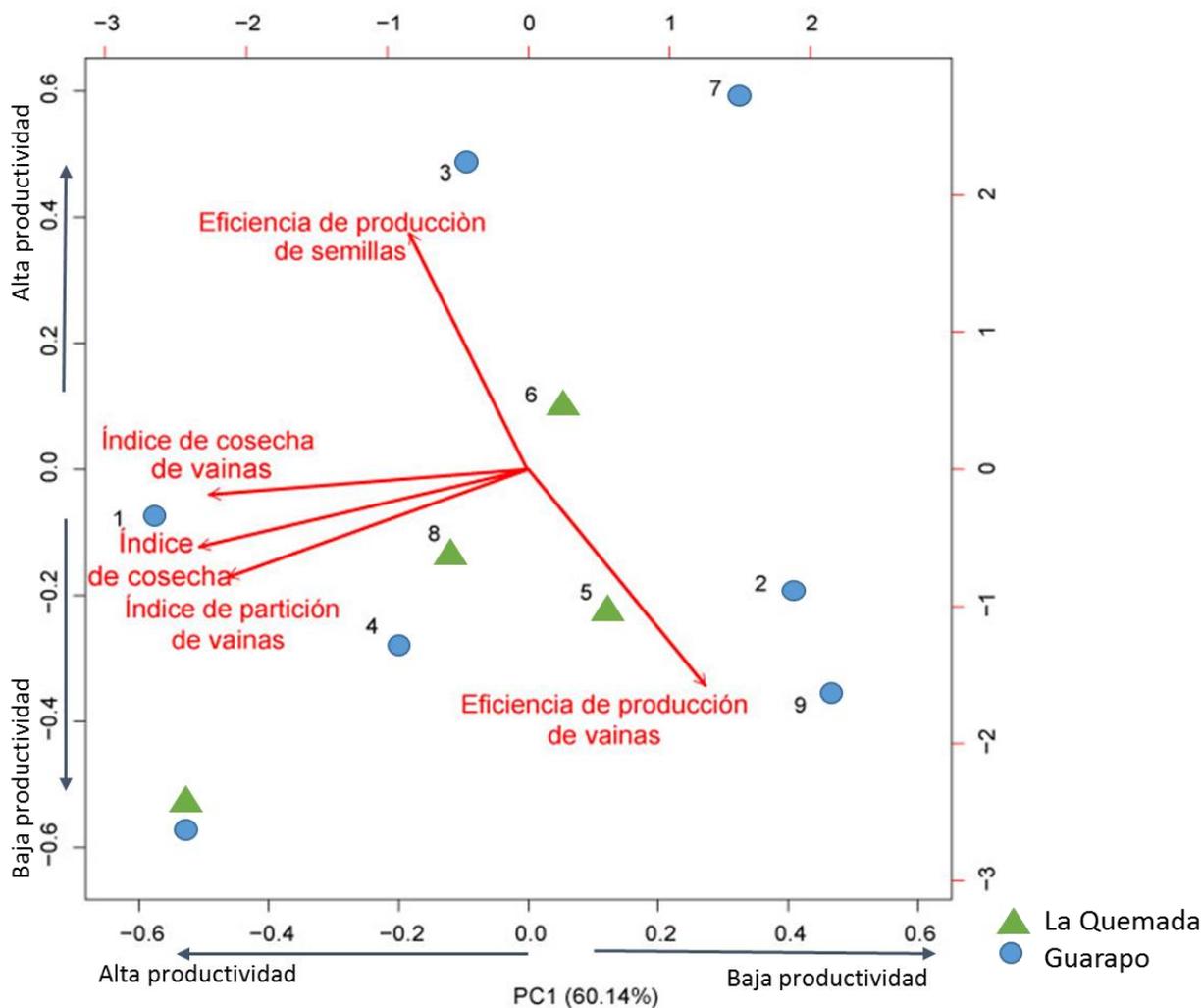


Figura 6. Gráfica de análisis de componentes principales de las variables de productividad.

Los patrones de asociación observados en el PCA se reflejaron en las correlaciones entre las variables (Cuadro 13). Las principales asociaciones se observan en las variables de biomasa de los componentes cosechables de las plantas, tanto de las vainas como de las semillas. La biomasa de las vainas respecto a la biomasa total de la planta estará relacionada positivamente con la biomasa invertida en semillas respecto a la total y consecuentemente con la biomasa de las semillas respecto a la de las vainas.

Cuadro 13. Correlación de las variables de productividad. En negritas se resaltan las correlaciones significativas, a un nivel $\alpha \leq 0.05$ (*).

Productividad/Productividad	Eficiencia producción semilla	Eficiencia producción vainas	Índice cosecha	Índice cosecha vainas	Índice partición vainas
Eficiencia producción semilla	1	-0.33	0.2	0.14	0.23
Eficiencia producción vainas	-	1	-0.32	-0.54	-0.13
Índice cosecha	-	-	1	0.92*	0.95*
Índice cosecha vainas	-	-	-	1	0.75*
Índice partición vainas	-	-	-	-	1

iv) Relación de variables de suelo y variables de productividad en cultivos de frijol.

Contrario a lo esperado, las variables de productividad no se correlacionaron con las variables del suelo en estos sistemas agrícolas, siendo los valores bajos y no significativos (Cuadro 14, Figura 7, 8, 9).

Cuadro 14. Correlación de las variables de productividad y variables de suelo en cultivos de frijol. En negritas se resaltan las correlaciones más altas, aunque no significativas.

	Eficiencia producción semilla	Eficiencia producción vainas	Índice cosecha	Índice cosecha vainas	Índice partición vainas llenas	pc1 productividad	pc2 productividad
Arcilla	0.09	0.08	-0.07	0.07	-0.17	0.06	0.07
Limo	-0.06	-0.32	0.02	-0.01	0.06	-0.07	0.13
pH	-0.06	0.13	0.38	0.5	0.25	-0.32	-0.3
C.E.	0.26	0.27	-0.04	-0.02	-0.06	0.05	0.04
D.A.	-0.3	-0.09	-0.16	-0.21	-0.11	0.17	-0.06
CMRA	0.3	-0.06	0.06	0.15	-0.02	-0.1	0.21
N (%)	0.09	0.49	-0.02	-0.05	0	0.1	-0.22
N (kg/m ²)	0.14	0.4	-0.15	-0.25	-0.06	0.2	-0.08
P (ppm)	0.18	0.05	0.13	0.05	0.19	-0.13	0
C _{total} (%)	0.21	0.26	-0.12	-0.07	-0.14	0.12	0.05
C _{total} (g/m ²)	0.3	0.12	-0.27	-0.21	-0.29	0.22	0.28
pc2 suelo	0.24	0.29	-0.11	-0.19	-0.04	0.13	0.03

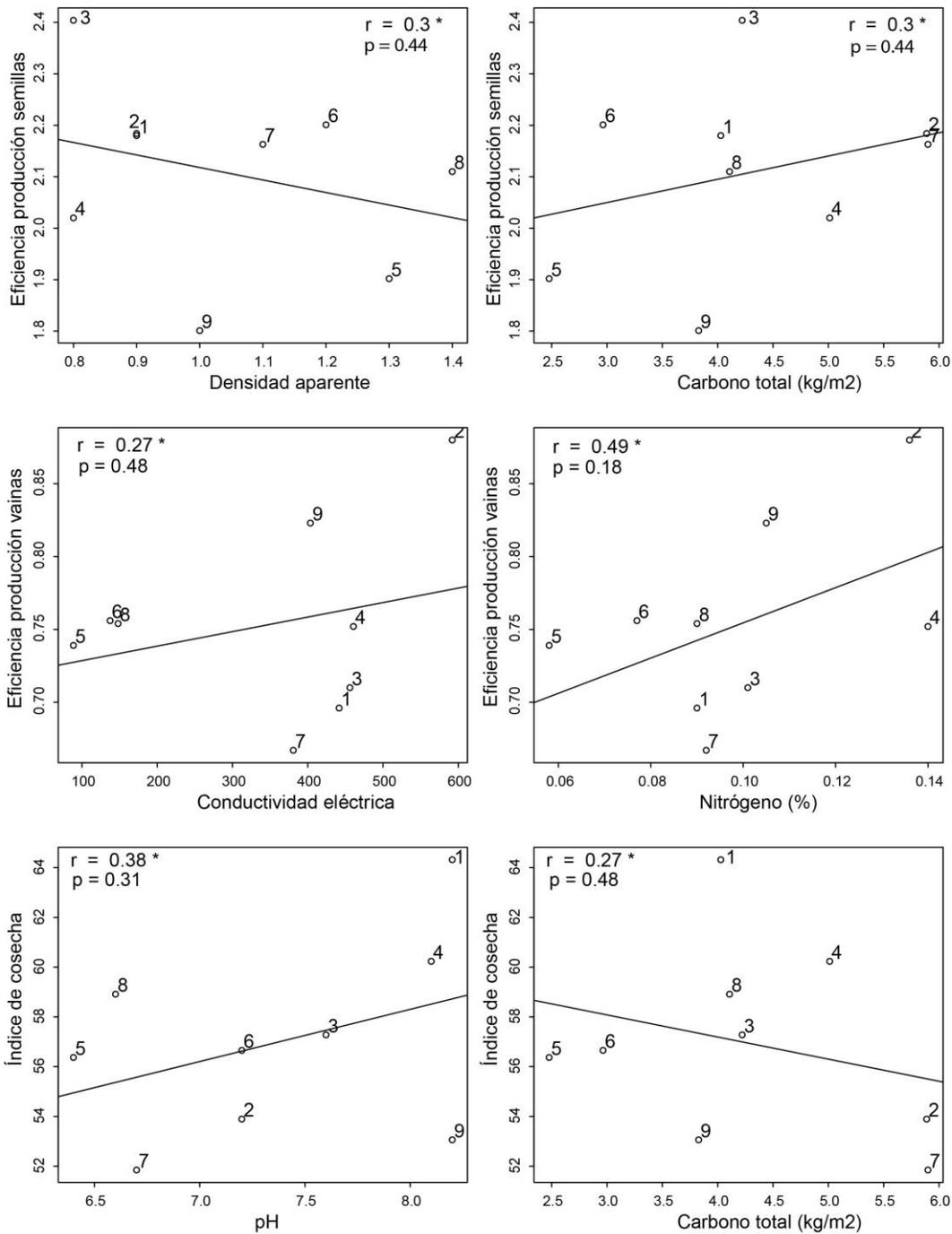


Figura 7. Gráfica de correlación de variables de productividad y variables edáficas. a) Eficiencia de producción de semillas vs. Densidad aparente del suelo, b) Eficiencia de producción de semillas vs. Carbono total del suelo, c) Eficiencia de producción de vainas vs. Conductividad eléctrica, d) Eficiencia de producción de vainas vs. Concentración de nitrógeno del suelo, e) índice de cosecha vs. pH, f) índice de cosecha vs. Cantidad de carbono total del suelo.

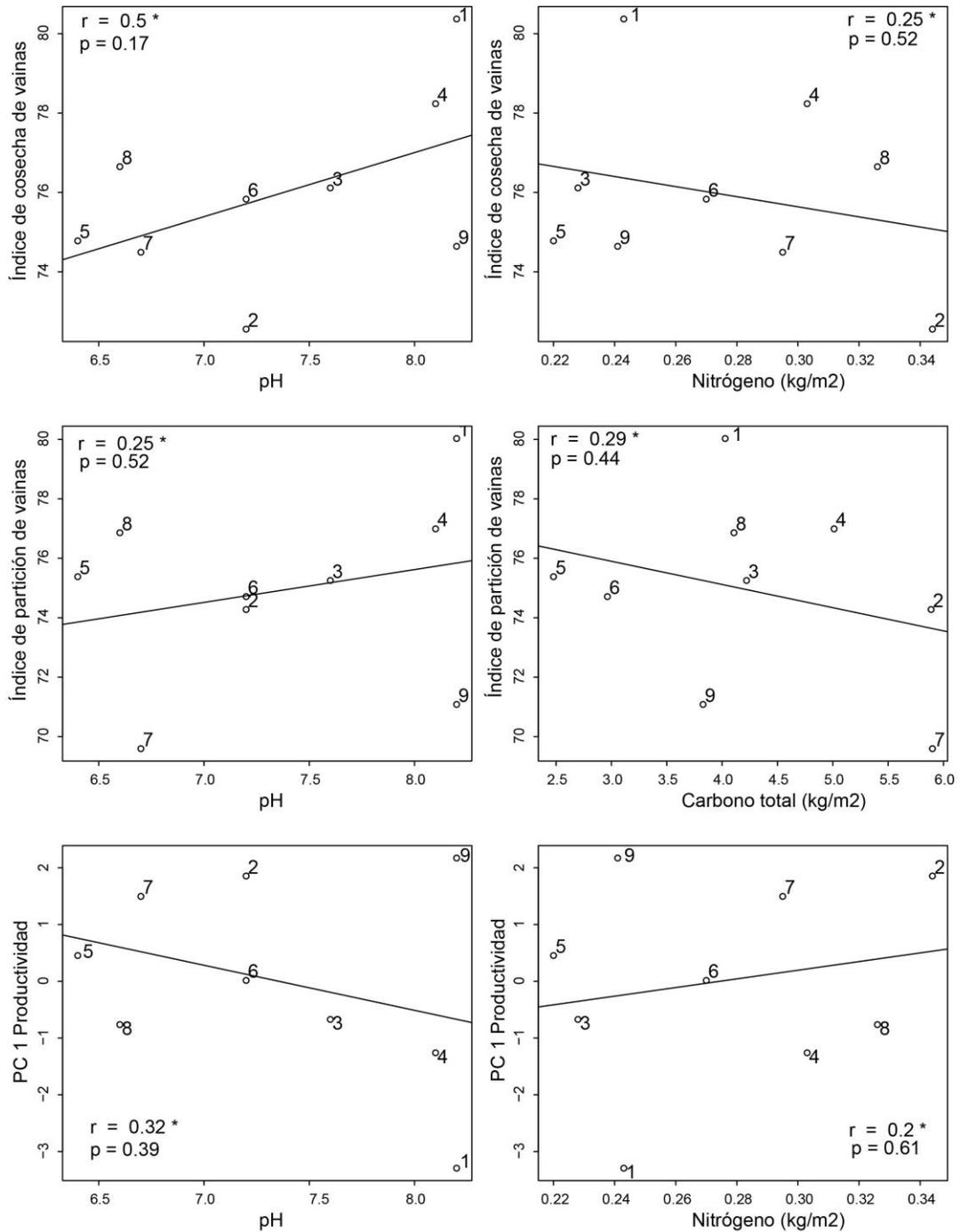


Figura 8. Gráfica de correlación de variables de productividad y variables edáficas. a) Índice de cosecha de vainas vs pH, b) índice de cosecha de vainas vs cantidad de nitrógeno del suelo, c) índice de partición de vainas vs pH, d) índice de partición de vainas vs cantidad de carbono total del suelo, e) componente principal 1 de las variables de productividad vs pH, f) PC1 vs cantidad de nitrógeno del suelo.

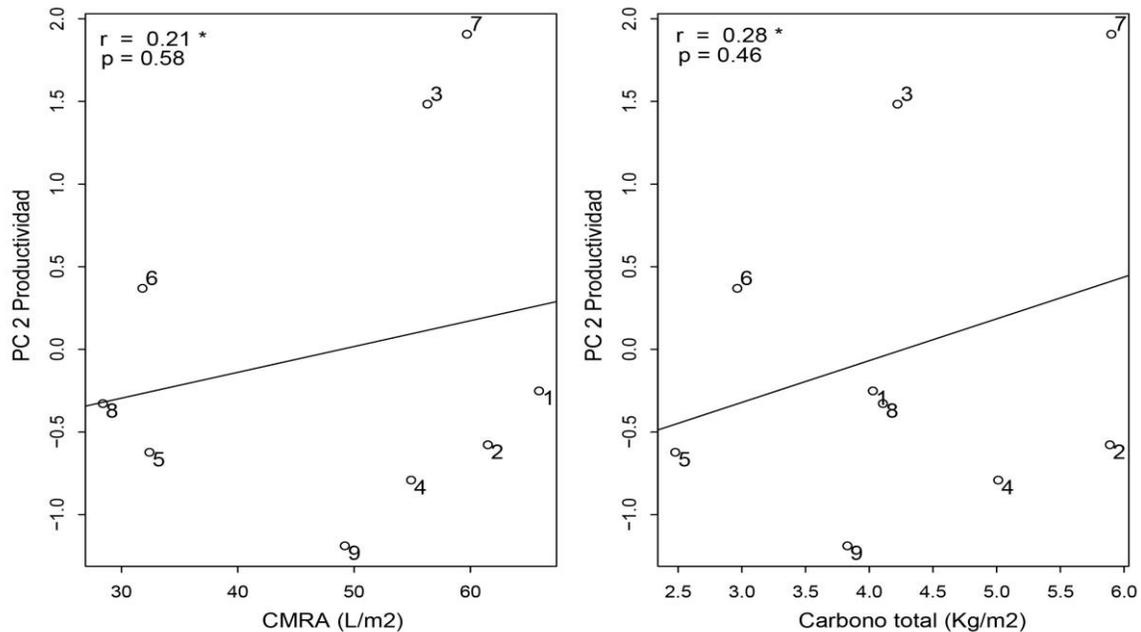


Figura 9. Gráfica de correlación de variables de productividad y variables edáficas. a) Componente principal 2 de las variables de productividad vs CMRA, b) PC2 vs cantidad de carbono total del suelz

VII. DISCUSIÓN

El estudio de las parcelas de cultivos de frijol de dos zonas del estado de Guanajuato permitió obtener información importante sobre el comportamiento edáfico y ecológico de los sitios. Por una parte, con el análisis de las condiciones edáficas se lograron diferenciar los suelos de Guanajuato Norte y Sur. Las características edáficas presentadas también permitieron identificar la forma en que se dará el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como sus principales limitaciones de acuerdo con la calidad del suelo. Esto pudo corroborarse mediante el análisis de la relación entre los rasgos funcionales del frijol y las variables edáficas, encontrando que en los suelos de baja calidad se desarrollaron plantas con una estrategia conservativa de recursos. Bajo esta estrategia y debido a las limitaciones del ambiente, la planta prefiere crear estructuras fuertes y mantener los recursos en ellas. Por el contrario, en suelos de alta calidad se desarrollan plantas con estrategias adquisitivas de recursos, siendo más productivas, pero de estructuras más efímeras y débiles.

La productividad de las plantas de frijol no permitió diferenciar a las zonas de estudio, aunque se encontraron patrones de mayor y menor productividad. Las parcelas de estudio se comportaron de manera heterogénea en cuanto a la productividad, lo que indica que existen diversos factores que pudieran estar influyendo en el rendimiento de los cultivos, como el manejo dado a los sistemas agrícolas. A pesar de que se esperaba una relación clara entre las variables de productividad y las variables edáficas, no ocurrió directamente. Sin embargo, se observan tendencias de proximidad entre las correlaciones de Pearson realizadas, lo que podría indicar que

sí existe una asociación entre las condiciones del suelo y la productividad de las plantas, y en posteriores estudios podrían tomarse en cuenta las limitaciones en este proyecto para corroborar dichas relaciones.

La información obtenida permitió poner a prueba las hipótesis del presente estudio, además de ser de gran importancia para el entendimiento de los sistemas agrícolas de frijol en las zonas de Guanajuato. En conjunto, la información generada permite postular algunas características de la planta como indicadores de la calidad del suelo, además de factores para las prácticas de manejo adecuadas a las condiciones del suelo y a las condiciones del cultivo en general, con el fin de encaminar a la sostenibilidad los agroecosistemas.

i) Características físicas y químicas de los suelos de las dos localidades estudiadas.

El análisis de las variables físicas y químicas del suelo en las parcelas de la zona Norte (La Quemada) y Sur (Guarapo) de Guanajuato, permitió caracterizar a estas dos zonas de acuerdo con las condiciones edáficas. Por un lado, las parcelas de Guarapo se agruparon en suelos con alto contenido de arcilla, con mayor capacidad de retención de agua, mayor valor de conductividad eléctrica, pH alcalino, y cantidad y concentración de nutrimentos (N y C). La mayor parte de las parcelas de Guarapo se localizaron sobre suelos de tipo Phaeozem. Estos suelos se desarrollan bajo condiciones subhúmedas con una marcada estacionalidad de lluvias. En estas condiciones la elevada acumulación de residuos vegetales y la actividad microbiana favorecen la acumulación de la materia orgánica en los horizontes superficiales y dándoles su coloración oscura. Esto podría explicar por qué la concentración de la materia orgánica fue mayor en estos sitios (Guarapo) en comparación con los suelos de La Quemada, en donde el clima es más árido. La materia orgánica es un importante indicador de la calidad del suelo que puede influir en otras variables como la densidad aparente, la concentración de nutrimentos y la porosidad. Por otra parte, las correlaciones indicaron que los suelos de las parcelas localizadas en La Quemada presentaron una alta densidad aparente, además de presentar bajos valores de pH, conductividad eléctrica, CMRA, y baja concentración de N y C total. Por el contrario, estas mismas parcelas presentaron un valor más alto de fósforo. Las densidades aparentes más altas de los sitios de La Quemada pudieron deberse a que los suelos de este sitio poseen una menor concentración de materia orgánica y carecen por completo de alofano, una arcilla mineral de bajo orden estructural y microporosidad que probablemente esté presente en pequeñas cantidades en los suelos de Guarapo. El alofano presenta carga positiva y atrae fuertemente a aniones como los grupos fosfato, haciendo que el fósforo sea poco disponible para las plantas. La materia orgánica influye tanto en las propiedades del suelo como en su comportamiento. Con respecto a las propiedades físicas, la materia orgánica favorece la formación y estabilización de agregados, da protección ante la rápida descomposición y ensambla arcillas. Esto proporciona estabilidad al suelo, lo que a su vez favorece la infiltración del agua y su retención, el desarrollo de raíces, el intercambio gaseoso y disminuye la erosión del suelo. En lo que respecta a las propiedades químicas del suelo, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, la reserva de nutrimentos e iones disponibles para los organismos. En cuanto al componente biológico, la materia orgánica incide en los procesos de mineralización y estimula el crecimiento de plantas (Julca-Otiniano, et al., 2006), por lo que impacta en la

productividad agrícola al ser una fuente importante de nutrientes. Lo anterior, como se esperaba, coincidió con lo obtenido en los suelos de las zonas de estudio; las propiedades edáficas de las parcelas se comportaron de manera similar y fueron influenciadas en gran medida por la materia orgánica.

La textura del suelo presentó una interacción importante con la materia orgánica en los suelos de las zonas de estudio. Se observó que los suelos arcillosos presentaron una relación positiva con la cantidad y concentración de carbono total y nitrógeno, con respecto a los suelos con mayor porcentaje de arena. Algunos estudios han reportado que los suelos arcillosos retienen más materia orgánica que los suelos arenosos, ya que la materia orgánica es absorbida sobre la superficie de las partículas de arcilla y limo, o, en ocasiones, es recubierta por minerales de arcilla (Hassink, 1994). Las moléculas orgánicas reaccionan con las arcillas y forman complejos que varían en estabilidad y propiedades. En la formación de los complejos órgano-minerales influyen diversos factores entre los que destaca el tipo y la cantidad de silicatos. Las esmectitas y el alofano están presentes en los suelos y son más eficientes que otras arcillas para formar complejos con la materia orgánica, a pesar de que no se realizaron análisis para detectarlos, se infiere que están presentes por el tipo de textura y el comportamiento de los suelos. Como se esperaba, los suelos franco-arcillosos de la zona de Guarapo presentaron una alta cantidad y concentración de materia orgánica y por ende de nitrógeno y carbono, siendo el nitrógeno el nutrimento esencial que más requieren las plantas para poder crecer (Havlin et al., 2013).

Asimismo, la conductividad eléctrica es un indicador de la concentración de sales en el suelo y se asocia con diversos factores como la concentración de la materia orgánica, la capacidad de retención de humedad, la textura del suelo, la concentración de bases intercambiables, el pH y en los suelos agrícolas a la aplicación de fertilizantes (Simón, et al., 2013). En este trabajo, la conductividad eléctrica se asoció positivamente a suelos que presentaron valores más altos de porcentaje de arcillas, cantidad de nitrógeno y carbono total, y capacidad máxima de retención de agua, sucediendo lo contrario con suelos arenosos.

Las tres variables edáficas antes descritas (la materia orgánica, la textura y la conductividad eléctrica) son propiedades que están relacionadas entre sí, de acuerdo con diversos estudios realizados (Simón, et al., 2013). Estas variables tuvieron un comportamiento similar en los sitios de estudio. El porcentaje de arcillas se relacionó positivamente con la concentración de materia orgánica y con la conductividad eléctrica. Esto se debe a que algunos componentes de la materia orgánica promueven la formación y estabilización de los agregados del suelo, lo que genera poros y macro poros tubulares llenos de agua y aire, según sea el caso, entre las partículas del suelo (Lal, 2004), que promueve, junto con otros factores como la cantidad de sales, la capacidad del suelo para conducir la corriente eléctrica. Lo contrario sucede en suelos arenosos. Concordando con lo anterior, los suelos de la zona de Guarapo presentaron un mayor porcentaje de partículas de arcilla, concentración de materia orgánica, valor de conductividad eléctrica y capacidad máxima de retención de humedad, y una menor densidad aparente, es decir una menor compactación. Por el contrario, los suelos de la zona de La Quemada presentaron menor cantidad de materia orgánica,

conductividad eléctrica y capacidad máxima de retención de humedad, pero son suelos con un mayor porcentaje de partículas de arena y compactación.

Por otra parte, en los ecosistemas terrestres la mayor parte del fósforo se encuentra en el suelo, siendo la principal fuente de este recurso los residuos de plantas, animales y microorganismos, que representan entre un 30 y 60% del P total (Cerón, et al., 2012). Los principales procesos del ciclo del fósforo ocurren en el suelo, como la adquisición por parte de la planta y su regreso mediante residuos vegetales y animales, reacciones de fijación en las superficies de arcillas y óxidos de hierro y aluminio, y el recambio biológico dependiente de la actividad microbiana. Sin embargo, la actividad bacteriana puede ser inhibida por la presencia de arcillas tipo montmorillonita (Turner et al., 2002), por lo que la disponibilidad de iones de fósforo se asocia con el tipo de suelo y sus características (Chen et al., 2008).

En los suelos estudiados, el fósforo presentó una relación negativa con la materia orgánica, la conductividad eléctrica y con la textura arcillosa del suelo. La concentración de fósforo presentó una relación negativa con la conductividad eléctrica como se ha reportado en algunos estudios (Simón, et al., 2013). Generalmente la descomposición de la materia orgánica contribuye a incrementar la concentración de fósforo en el suelo. Sin embargo, en los suelos volcánicos y arcillosos de Guarapo, que presentaron mayor cantidad de materia orgánica, el fósforo disponible fue bajo. Esto puede deberse, en parte, a la presencia de arcillas minerales de bajo orden estructural como el alofano, que, aunque no es la arcilla dominante de este tipo de suelos, suele estar presente. El alofano es una arcilla mineral de bajo orden estructural con carga positiva que atrae fuertemente a los grupos fosfato con carga negativa, por lo que tiene la capacidad de inmovilizar (fijar) el fósforo en su superficie, quedando atrapado y no disponible para que las plantas y otros organismos (Chen et al., 2008). El fósforo Bray u Olsen (dependiendo del pH) únicamente detecta la fracción disponible de este nutriente esencial pero no los totales presentes en el suelo. De lo anterior se deriva que en la zona de La Quemada se presentó una mayor concentración de fósforo disponible para los organismos, en comparación con los suelos de la zona de Guarapo, posiblemente por la presencia de arcillas que inmovilizan el elemento.

La presencia de arcillas como el alofano en los suelos de la zona de Guarapo es resultado de la intemperización de los elementos volcánicos como la ceniza, material parental del cual se originaron los suelos de esta zona, que les otorga propiedades específicas. Los suelos derivados de cenizas volcánicas poseen propiedades particulares originadas debido a la presencia dominante de un conjunto de minerales no cristalinos o de bajo orden estructural, que condicionan su comportamiento, especialmente cuando se encuentran en presencia de agua. El agua al ingresar al interior de las partículas queda adherida como en la superficie exterior, además de que pueden quedar moléculas de agua enlazadas en las aberturas producidas por la estructura de los alofanos. Así los suelos volcánicos presentarán un comportamiento diferente al tradicional, destacando que poseen una gran capacidad de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades secas y cambios en su estructura dependiendo el tipo de secado empleado (Sanhueza, et al., 2011). Derivado de las características mencionadas se cuenta con la presencia de arcillas minerales de bajo orden estructural tipo alofano que poseen una gran área específica, alta

cantidad de humus, escasa disponibilidad de P y una descomposición lenta de materiales orgánicos complejados (Shoji et al., 1993), lo que coincidió con el comportamiento de los suelos de la zona de Guarapo. Aunque no se realizaron estudios mineralógicos suponemos la presencia de alofano, mezclado con arcillas expandibles (2:1) tipo esmectita, pues al estar en contacto con el agua, estos suelos tomaron una textura muy plástica, singular al comportamiento que poseen suelos con este tipo de minerales.

En contraste, los suelos de la zona de La Quemada son más arenosos, con bajas conductividades eléctricas, agua disponible para las plantas, concentraciones de nutrimentos (N y C), y cantidad de materia orgánica; por el contrario, presentaron mayor cantidad de fósforo. La ausencia de arcillas tipo alofano favorece que este nutrimento esté disponible para las plantas. Sin embargo, para que lo anterior pueda ser corroborado, es necesario realizar un análisis sobre composición mineralógica, como se ha desarrollado en diversos estudios con distintos tipos de suelo (Acevedo-Sandoval, et al., 2010; Alcalá, et al., 2009). Esto permitirá saber qué tipo de arcillas se encuentran en estos suelos y la proporción que existe de aquellas capaces de fijar el fósforo.

Los dos nutrimentos esenciales que más limitan el crecimiento de las plantas y particularmente de los cultivos son el N y el P. El nitrógeno es el nutrimento que más requieren las plantas para poder crecer y el fósforo es el nutrimento que menos disponible está de forma natural, por lo que es escaso en el suelo. Ambos determinan el crecimiento vegetal que depende directamente del suelo. En los suelos del presente estudio, la concentración de nitrógeno se asoció positivamente con una textura arcillosa, lo contrario se observó con los suelos con textura arenosa. En el cultivo de plantas de frijol, el nitrógeno del suelo no es tan relevante como en otros cultivos. Las leguminosas son un grupo de plantas que se asocian con bacteria diazótroficas para formar nódulos que tienen la capacidad de fijar el nitrógeno que se encuentra en la atmósfera. Por ello, en los suelos de la zona de La Quemada, el frijol podrá crecer a pesar de la poca abundancia en el suelo de este nutrimento, pues el elemento es tomado de la atmósfera por organismos fijadores de nitrógeno que lo hacen disponible para que las plantas lo incorporen a su metabolismo. En la zona de Guarapo, el abastecimiento de nitrógeno no constituye una limitante, sin embargo, la poca disponibilidad de fósforo podría ser el factor que esté limitando el crecimiento de las plantas de acuerdo con la ley de Liebig, que establece que la proporción de crecimiento de las plantas y su productividad dependen del nutrimento en cantidad mínima en términos de necesidad y disponibilidad, por lo que cualquier condición que se aproxime al límite de tolerancia para el organismo es un factor limitante (Voisin, 1966). Es importante considerar que la dinámica del nitrógeno es afectada por la temperatura, el tamaño de partícula de los residuos, la agregación, el tipo de suelo, la humedad, el anegamiento y la anaerobiosis (Nannipieri y Eldor, 2009). También debe tomarse en cuenta que diversas propiedades físicas y químicas del suelo como la textura, la materia orgánica, las concentraciones de sales y el pH, influyen en el crecimiento y desarrollo de los cultivos y por ende en el rendimiento del grano.

Para mantener la fertilidad del suelo es importante conservar las condiciones físicas de este recurso. La descomposición de los agregados del suelo, la pobre estructura del suelo y la falta de un espacio poroso, restringen el crecimiento de las raíces del cultivo, limitando la exploración

eficiente en la profundidad del perfil para buscar agua y nutrimentos. Estas condiciones edáficas también pueden provocar la acumulación del agua en la superficie del suelo, aumentando la prevalencia de enfermedades en la planta, sobre todo en la raíz. Además, aumenta la posibilidad de formación de una costra superficial que por su compactación impide la germinación y la emergencia de plántulas (Haynes, y Naidu, 1998). De acuerdo con algunos estudios, y como primera vía a una recomendación en este proyecto, podría implementarse el uso y la aplicación de materia orgánica en forma de composta o lombricomposta, estas enmiendas mejoran el suelo debido a que mantienen sus propiedades y, por lo tanto, el crecimiento y desarrollo de las plantas (Haynes, y Naidu, 1998). Además, se ha comprobado que aumenta la diversidad y abundancia microbiana (Tang, et al., 2012; Fuka et al., 2008), aumenta las concentraciones de carbono, nitrógeno y fósforo totales, disminuye el pH (Cerón, et al., 2012), y se obtienen plantas más vigorosas y con mayor crecimiento, reduciendo los efectos desfavorables de la sequía (Hai et al., 2009). De lo planteado anteriormente, deriva pensar que la fertilización orgánica resulta ventajosa desde el punto de vista económico y ambiental en el desarrollo de sistemas agrícolas, por lo que es una importante recomendación, sobre todo para productores locales, el aplicar esta técnica para la mejora de sus cultivos. Es importante aclarar que el uso de la composta como enmienda edáfica no excluye por completo el uso de fertilizantes químicos que son necesarios para obtener la máxima productividad en cultivos.

En el paisaje existe una diversidad de suelos como resultado de la interacción entre factores ambientales como el clima, el material parental, la topografía, los organismos y el tiempo (Jenny, 1941). Sin embargo, frecuentemente el agricultor aplica prácticas de manejo sin tomar en consideración esta variabilidad edáfica, por lo que muchas de las estrategias diseñadas resultan deficientes para los cultivos (Simón, et al., 2013). Por ello, resulta indispensable realizar estudios en los que se tomen en cuenta propiedades físicas, químicas, biológicas y de manejo, que nos permitan entender en conjunto el sistema agrícola y poder influir en mejorar las propiedades edáficas, incluyendo la fertilidad, de acuerdo con los procesos presentes en los diferentes tipos de suelos, y con ello proponer estrategias adecuadas para la sostenibilidad de los agroecosistemas.

En resumen, de acuerdo con el análisis de las condiciones edáficas se pudo observar que existen diferencias en los suelos de las zonas de Guanajuato La Quemada y Guarapo. Por una parte, los suelos de La Quemada en general presentaron características que se asocian con suelos de baja calidad para el crecimiento del cultivo de frijol, es decir, son suelos compactados, con baja cantidad de materia orgánica y de nutrimentos y poca agua disponible, lo que podría limitar el desarrollo de las plantas. Por su parte, Guarapo presentó suelos con mayor cantidad de materia orgánica, nutrimentos, agua disponible, están mejor estructurados y presentan menor compactación, por lo que el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos podría darse en mejores condiciones por ser más fértiles. Para verificar esto, se examinaron correlaciones de las variables del suelo y algunos rasgos funcionales de las plantas de frijol, lo que nos permitió conocer la respuesta de las plantas ante las distintas condiciones edáficas.

ii) Comportamiento de los rasgos funcionales de las plantas

Los suelos arcillosos se asociaron a suelos de mayor calidad, es decir, con características que dan condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol. Por el contrario, los suelos con mayor porcentaje de arena presentaron características en las que el desarrollo del cultivo puede verse obstaculizado. Esto concuerda con diversos estudios realizados acerca de las estrategias ecológicas expresadas por las plantas, en los que se mencionan que estas dependen en gran medida de las condiciones ambientales y de la disponibilidad de los recursos como agua y nutrientes (Díaz, et al., 2004; Wriqth, et al. 2004; Freschet, et al., 2010; Reich, et al., 1999; Domínguez, et al., 2012).

Las plantas de los suelos arcillosos, en contraste con aquellos arenosos, exhibieron una estrategia adquisitiva de recursos, en la que las plantas tuvieron mayor crecimiento. Estas plantas fueron altas, con órganos menos densos, delgados, sobre todo las raíces. Las hojas fueron más delgadas, menos densas, aunque con mayor área, es decir, tuvieron mayor unidad de adquisición, lo que a su vez les permite ser más productivas. También presentaron menor contenido de nutrientes, sobre todo de fósforo. En estos suelos, los individuos presentaron un menor porcentaje de inversión de biomasa en raíces respecto a la invertida en tallos y hojas, lo que hace a la planta un poco más productiva en estos dos órganos aéreos. También es posible encontrar en las raíces de los individuos mayor número de verticilos, que es una característica de la planta que afecta la eficiencia de adquisición de nutrientes (PennState College of Agricultural Science, 2017), mostrando que a una mayor concentración de elementos como nitrógeno y carbono en los suelos arcillosos, mayor habilidad tendrán las plantas para formar raíces basales con diferentes ángulos, permitiéndoles explorar más volumen de suelo superficial, donde se concentran los nutrientes menos móviles como el fósforo. Las características antes descritas de las plantas corresponden a la zona de Guarapo y pueden deberse en parte a que el clima del sitio es un factor que favorece el crecimiento, pues se tiene alta humedad y una temperatura adecuada para el desarrollo de las plantas. Asimismo, diversas características edáficas como la textura del suelo, la presencia de materia orgánica y nutrientes, así como de agua disponible, permitieron que la planta tenga a su disposición los recursos suficientes para su sobrevivencia y desarrollo presentando una estrategia adquisitiva de recursos. Esta expresión adquisitiva concuerda con Reich (2014) y el espectro económico de las plantas “rápido-lento” propuesto. En el caso del frijol, las plantas de los suelos de Guarapo se encontraron más cerca del extremo “rápido” de este espectro que las plantas de La Quemada.

En contraste, en los suelos de la zona de La Quemada, las plantas expresaron una estrategia conservativa de recursos. Los suelos con mayor porcentaje de arena se asociaron a una baja calidad, por lo que las plantas de frijol presentan estructuras radicales con mayor biomasa, así como mayor concentración de fósforo en sus estructuras. Estos suelos que a su vez presentaron mayor compactación influirán en la disponibilidad y accesibilidad de los recursos y, por lo tanto, en el desarrollo de las plantas de frijol. Las plantas que se desarrollaron en los suelos arenosos presentaron hojas con mayor grosor, mayor diámetro de tallo y un sistema radical con alta cantidad de biomasa, estructura a la cual se le invierte mayor biomasa con respecto a hojas y tallos, además de presentar mayor longitud radical específica, aunque una menor densidad del

tejido radical y área superficial de la raíz. La concentración de nutrimentos como el fósforo, en suelos compactados fue mayor tanto en hojas como en raíces, lo que podría estar indicando una mayor disponibilidad de este nutrimento en el suelo. Retomando el espectro económico de las plantas (Reich, 2014), al desarrollarse en un ambiente escaso en recursos, las plantas presentarán una estrategia lenta, con baja tasa de respiración, bajas concentraciones de nutrimentos en hojas y raíz, tejidos densos y menor capacidad de mover y perder agua, pero tejidos de vida útil mayor, pues son individuos que buscan conservar elementos para sobrevivir. En este sentido, las plantas están “protegiendo” esta inversión de recursos, pues tienen pocos recursos disponibles para recuperar lo que han invertido en la formación de sus estructuras y en los procesos metabólicos, limitando así el desarrollo de los individuos, pero produciendo estructuras más resistentes, como ocurre en La Quemada. Es por ello que en condiciones de escasos recursos, resulta mejor tener una estrategia lenta, ya que implica ahorros considerables como la reducción de la respiración, la pérdida de C y agua, o la reducción de costos para la búsqueda de recursos y el costo de flujo de nutrimentos en condiciones infértiles (Craine, 2009). No obstante, en términos de productividad a corto plazo, la estrategia adquisitiva podría resultar más conveniente en los sistemas agrícolas.

Cabe destacar que se obtuvieron diversas correlaciones de magnitud fuerte entre variables de suelo y rasgos funcionales del cultivo de frijol. Esto es relevante para el proyecto porque el objetivo principal fue detectar posibles indicadores biológicos de calidad del suelo derivados de las características de las plantas. Algunos rasgos foliares asociados a variables de calidad del suelo son el grosor, la concentración de fósforo, y el área foliar específica. En los rasgos relacionados con las raíces sobresalen la concentración de fósforo, el diámetro, la biomasa total y la densidad del tejido radical. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que para que dichos rasgos funcionales puedan ser considerados como potenciales indicadores, deben ser de medición y visualización sencilla, accesible para los productores locales. Entre los rasgos mencionados, aquellos que cumplen con estas características son el grosor foliar y el área foliar, así como el diámetro de la raíz principal. Por ello, estas características podrían postularse como posibles indicadores de fácil medición para inferir la calidad del suelo en esta variedad de frijol.

iii) Productividad de los cultivos de frijol

En cuanto al análisis de las variables de productividad de la zona de La Quemada y de Guarapo en Guanajuato, la productividad en las parcelas tuvo comportamientos diversos. Las condiciones ambientales, como las variables edáficas, tienen un papel importante en el comportamiento de la productividad (Ali y Talukder, 2008); sin embargo, también se deben tomar en cuenta otros factores relacionados al manejo de la parcela. El uso de fertilizantes, plaguicidas, el riego y el cuidado en general de las parcelas influye en gran medida en la productividad que tiene un cultivo (Tiftonell, et al, 2008). La dispersión en la respuesta de la productividad puede deberse, principalmente, aunque no por completo, a la diferencia en los tipos de manejo de cada parcela, pues son diferentes personas (productores) encargados del cuidado y manejo de cada sistema y cada uno de ellos tiene diferentes costumbres y formas de realizarlo. En estas zonas de estudio existen productores que usan fertilizantes y plaguicidas orgánicos, algunos sólo químicos, además de diferir en la forma de arar o la limpieza que se le da a las parcelas para eliminar malezas, así

como en el tiempo de descanso que se le da al suelo. Cabe mencionar que este estudio tiene un enfoque en el que no se examinó con detalle el manejo de las parcelas; sin embargo, este aspecto puede dar más información acerca de la parcela y puede permitir profundizar en el entendimiento del comportamiento de la productividad o de las condiciones del suelo o del cultivo en general. Por ello, resulta de gran importancia que para estudios posteriores se tome en cuenta este factor con mayor detalle, de forma que sea posible complementar la información que se obtenga del análisis de la relación planta-suelo y la obtenida de las parcelas.

La mayor parte de las parcelas presentaron baja productividad del cultivo de frijol. Solo dos parcelas presentaron productividades considerables (parcelas 1 y 3 de la Figura 6), y corresponden a la zona de Guarapo, es decir, a los suelos que presentan mejores condiciones para el desarrollo de la planta; sin embargo, no se puede hacer una generalización de la relación de estas condiciones edáficas y la productividad de los sistemas agrícolas, pues como se mencionó hay factores también asociados a aspectos de manejo.

iv) Influencia de las variables edáficas en la productividad de los cultivos de frijol

Las variables edáficas y las de productividad presentaron una relación poco significativa, sugiriendo que posiblemente hay más variables, además de las características del suelo, definiendo la productividad final del sistema. Como se mencionó anteriormente, existen otros factores que no fueron considerados en este estudio y que están influyendo en la productividad del cultivo, tales como las condiciones de manejo, pues es un importante elemento en un agroecosistema. Asimismo, se debe tomar en cuenta que las variables edáficas sí están interactuando directamente con la planta, lo que se expresa en los rasgos funcionales, como se observó en el apartado ii) de esta sección, y que puede estar afectando a la productividad. Es decir, es posible que el suelo se asocie con la productividad de manera indirecta al influir en el desarrollo de la planta.

Por otra parte, es importante señalar que el tamaño muestral para los análisis de este trabajo fue de nueve parcelas en total. Esto se debió principalmente a que los sitios de estudio son parcelas “reales”, no experimentales, cuyos productos son utilizados principalmente para autoconsumo, por lo que las condiciones del cultivo (desde la germinación de la semilla, hasta el desarrollo completo de la planta) son influenciadas por las condiciones ambientales del sitio y por las técnicas de manejo dadas por el productor. Por estas razones, no fue posible involucrar a un número mayor de productores en el estudio, y uno de los productores que había inicialmente aceptado colaborar, no tuvo crecimiento de las plantas por motivos del manejo realizado. Esto restringió el tamaño muestral al mencionado anteriormente. Entre las correlaciones de Pearson entre variables edáficas y productividad, se observaron algunos valores relativamente altos, aunque no significativos, que se consideraron importantes y que muy probablemente se volverían significativos con un tamaño de muestra mayor. Se puede observar que algunas variables edáficas como la cantidad de carbono total, nitrógeno, pH, densidad aparente y capacidad máxima de retención de agua del suelo tienden a estar relacionados con la productividad de los cultivos, aunque no de forma significativa. En este punto es importante recomendar que, en estudios posteriores, se tome en cuenta un tamaño muestral mayor para retomar y comprobar dichas

relaciones, complementando así lo obtenido aquí. Se ha encontrado que variables edáficas como el pH, la suma de bases, saturación de Al, capacidad de intercambio catiónico, la pendiente del terreno, el potasio, el calcio, la relación Ca+Mg/K, influyen en el rendimiento de algunos cultivos como la papa, o el mango, lo que las hace útiles como indicadores de la calidad de suelo (Muñoz, J., et al., 2006; Valbuena, C., et al., 2008).

VIII. CONCLUSIÓN

En este trabajo se analizó la relación existente entre rasgos funcionales de la planta de frijol y variables del suelo en dos localidades con diferentes características ambientales. Esto permitió profundizar en el entendimiento del comportamiento de las plantas en dos ambientes contrastantes y las estrategias empleadas para la adquisición y uso de recursos. Además, se identificaron características funcionales de las plantas que pudieran ser empleadas en la evaluación y el monitoreo de la calidad del suelo y de las prácticas de manejo llevadas a cabo en sistemas agrícolas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se presentan conclusiones que permiten entender de mejor manera el funcionamiento del agroecosistema de frijol en dos localidades de Guanajuato. Por una parte, se diferenciaron las dos zonas de estudio de acuerdo a las características de los suelos presentes en las parcelas de frijol. En la zona de La Quemada los suelos presentan baja densidad aparente, baja cantidad de materia orgánica y de nutrimentos, así como poca agua disponible, que pueden considerarse características que limitan el desarrollo de las plantas de frijol. Por su parte, los suelos de la zona de Guarapo presentaron características favorables para el crecimiento de las plantas, como mayor cantidad de materia orgánica, de nutrimentos, de agua disponible, así como una mejor estructura.

De acuerdo a las relaciones determinadas entre variables edáficas y características funcionales de las plantas, se comprobó la aptitud del suelo para el desarrollo del cultivo. Los suelos arcillosos de la zona de Guarapo presentaron características favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol, pues estos individuos mostraron una estrategia adquisitiva de recursos, lo que les permitió crecer con mejores condiciones y ser más productivas en sus diversos órganos. Por el contrario, los suelos con mayor porcentaje de arena presentaron características en las que el desarrollo del cultivo podría ser obstaculizado. Los individuos de la zona de La Quemada presentaron una estrategia conservativa de recursos, con una tasa lenta de crecimiento, de tallas menores en sus diferentes órganos y a su vez con menor productividad del cultivo a corto plazo. Esto permitió catalogar a los suelos de la zona de Guarapo de buena calidad para el desarrollo del cultivo, y a los suelos de La Quemada como suelos de baja calidad para el cultivo de frijol.

De lo anterior, se destacaron algunas relaciones entre variables edáficas y rasgos funcionales. Se detectaron posibles indicadores biológicos de calidad del suelo derivados de las características de las plantas. Entre las características sobresalientes están el grosor foliar, la concentración de fósforo en la hoja y raíz, el área foliar específica, el diámetro de la raíz, la biomasa total radical y la densidad del tejido radical. Entre estos rasgos, el grosor foliar, el área foliar y el diámetro de la raíz principal cumplen con las características para ser propuestas como posibles indicadores de fácil

medición para inferir la calidad del suelo en esta variedad de frijol. Sin embargo, para que estos indicadores realmente puedan ser implementados, es necesario tomar en cuenta la opinión de los agricultores locales. Finalmente son ellos los que implementarán los indicadores y quienes trabajan directamente con el suelo. Estos nuevos indicadores pueden potencialmente contribuir a que el agricultor cuente con herramientas fáciles de medir y útiles para realizar el monitoreo del manejo que llevan a cabo en sus parcelas y con ello mantener o mejorar a largo plazo las condiciones edáficas, favoreciendo con esto la productividad de los agroecosistemas a nivel local e incluso regional. Por ello, cabe mencionar que, como última etapa de este trabajo, los resultados aquí obtenidos se presentarán a los agricultores con los que se trabajó directamente, y quienes llevan a cabo el cuidado y manejo del cultivo en sus parcelas, lo que a su vez permitirá generar una retroalimentación y evaluar la propuesta de los indicadores de calidad de suelo.

Cabe destacar que la productividad del cultivo no diferenció a las dos zonas de estudio y presentó relaciones poco significativas con las condiciones edáficas. Esto probablemente se debe a que existen diversos factores y variables que intervienen en la producción del cultivo, uno de ellos de gran importancia es el manejo dado a la parcela por parte del productor, pues le confiere características diferentes al suelo y a las plantas de cada agroecosistema. Si bien la condición natural del suelo es importante y tiene influencia en el sistema, son las prácticas de manejo las que determinan significativamente el desarrollo del cultivo y su productividad.

Cabe resaltar que la presente tesis se integra en el proyecto CONACyT 247672 titulado “Biodiversidad y Ecología Funcional de suelos, conservación y resiliencia de sistemas naturales, agroecológicos y agroforestales” y la información aquí obtenida responde a una problemática de gran relevancia a nivel nacional. Ante la crisis de degradación de suelo existente y el manejo inadecuado de los sistemas agrícolas, resulta de gran relevancia generar herramientas que permitan evaluar y monitorear la calidad del suelo y que a su vez promuevan la conservación y sostenibilidad de este recurso vital. La generación de este tipo de información puede integrarse en la toma de decisiones sobre el manejo de sistemas agrícolas, además de que puede ser aplicable, en este caso, a otros cultivos de frijol, de otras variedades y en diversas zonas a nivel local, regional e incluso nacional, por lo que podrían formar parte de la solución a diversas problemáticas ambientales.

IX. RECOMENDACIONES

Para complementar este trabajo es importante tomar en cuenta algunas consideraciones ya sea para futuros trabajos con enfoque similar o para complementar la información que aquí se obtuvo. La información generada permite mejorar el entendimiento de los agroecosistemas de frijol en dos localidades contrastantes de Guanajuato. Sin embargo, en el proyecto hubo factores que no fueron tomados completamente en cuenta como es el caso del manejo. En cada parcela existen productores que aplican diversas prácticas de manejo, algunos utilizan fertilizantes y plaguicidas orgánicos, algunos solo químicos, existen diferencias en la forma de arar la tierra, ya sea con yunta o tractor, y también en la limpieza que se le da a las parcelas para eliminar malezas, así como en el tiempo de descanso que se le da al suelo. A pesar de que en este estudio no se examinó con detalle el manejo de las parcelas, se debe destacar la importancia de este aspecto ya

que puede proporcionar información sobre la parcela de estudio y permitiría profundizar en el entendimiento del comportamiento de la productividad, de las condiciones del suelo y del cultivo en general. Por ello, resulta de gran importancia que para estudios posteriores se analice este factor con mayor detalle, de forma que sea posible complementar la información que se obtenga del análisis de la relación planta-suelo y la obtenida de las parcelas.

En cuanto a la propuesta de características de las plantas como indicadores de calidad del suelo, además de rescatar la relación planta-suelo se deben tomar en cuenta aspectos locales. Para que los indicadores puedan ser implementados, es necesario tomar en cuenta la opinión de los agricultores locales, pues son ellos quienes harán uso de dichas variables y quienes trabajan directamente con las parcelas. La discusión conjunta del potencial de estos indicadores de calidad de suelo provenientes de las plantas posibilitará que el agricultor cuente con herramientas fáciles de medir y útiles para realizar el monitoreo del manejo que lleva a cabo en sus parcelas y que le permitirá mantener o mejorar a largo plazo las condiciones edáficas. El objetivo último de todo esto es favorecer la productividad de los agroecosistemas a nivel local e incluso regional. Por ello, como última etapa de este trabajo, los resultados aquí obtenidos se presentarán a los agricultores con los que se trabajó directamente, y quienes llevaron a cabo el cuidado y manejo del cultivo en sus parcelas, lo que a su vez permitirá generar una retroalimentación y evaluar la propuesta de los indicadores de calidad de suelo.

La generación de herramientas para el monitoreo y evaluación de la calidad del suelo resulta de gran importancia ante la creciente preocupación por la degradación del suelo. Estas herramientas promueven la conservación y sostenibilidad de este recurso vital a mediano y largo plazo. Además, son elementos que pueden integrarse en la toma de decisiones sobre el manejo de sistemas agrícolas, ya sea por los mismos agricultores o incluso en instituciones donde las actividades agrícolas son el eje rector. Los indicadores propuestos podrían aplicarse a cultivos de frijol de otras variedades, en otras zonas a nivel local, regional o incluso nacional, aunque sería muy importante validar que los resultados son similares en otras variedades. Finalmente, este trabajo podría marcar pautas para replicar el enfoque en estudios similares para otros cultivos y en otras zonas, lo que estaría contribuyendo a la solución de problemáticas ambientales asociadas con la grave pérdida de suelo.

X. REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., et al., 2010. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas en suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y ciencia* Vol. 26 No.2. Villahermosa, 2010. Recuperado el día 10 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Otilio_Sando/4.pdf
- Acosta, J. y Kohashi, J., 1989. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. *Field Crops Research*, Vol. 20, Issue 2, Pages 81-93. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429089900543>
- Alcalá, M., et al., 2009. Mineralogía y retención de fosfatos en andisoles. *Terra Latinoamericana* vol.27 no. 4. Chapingo oct./dic. 2009. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000400001
- Ali, M.H. y Talukder, M.S., 2008. Increasing water productivity in crop production. A synthesis. *Agricultural Water Management*, Vo. 95, Issue 11, November 2008, pages 1201-1213. Recuperado el día 25 de enero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408001522>
- Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Invertebrate Biodiversity as Biondicators of Sustainable Landscapes*. 1999, pages 19-31. Recuperado el día 23 de enero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444500199500054>
- Altieri, M.A., y Nicholls, C.I., 2012. Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Agroecología* 7 (2):65-83, 2012. Recuperado el día 7 de febrero de 2018. Disponible en: <http://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182861/152301>
- Álvarez-Sánchez, M.E., Marín-Campos, A., 2011. Manual de Procedimientos Analíticos para Suelos y Plantas. Laboratorio de Química de Suelos, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, México. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: http://ecotech.uy/docs/suelos/Electronico_Manual_Procedimientos_Analiticos_2011_fertilidad.pdf
- Álvaro-Fuentes, J., et al., 2009. Soil aggregation and soil organic carbon stabilization: effects of management in semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil Science Society of America Journal*. Soil and water management and conservation. Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Societies. Vol. 73, No. 5, p. 1519-1529. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/73/5/1519>
- Astier-Calderón, M., et al. 2000. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/302/30236511/>
- Ball-Coelho, B.R., et al. 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil and Tillage Research*, Vol. 45, Issues 3-4, pages 237-249. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719879700086X>
- Baraloto, C., et al., 2010. Decoupled leaf and stem economics in rain forest trees. *Ecology letters* 13(11): 1338-47. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1461-0248.2010.01517.x>
- Barbaro, L., et al., 2014. Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://inta.gob.ar/documentos/importancia-del-ph-y-la-conductividad-electrica-ce-en-los-sustratos-para-plantas>
- Bautista, A., et al., 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas (en línea)*, Vol. XIII, núm. 2, mayo-agosto, 2004. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/540/54013210.pdf>
- Bennink, M., 2005. Eat beans for good health. *Annual Report of Bean Improvement Cooperative* 48:1-5. Recuperado el día 13 de febrero de 2018. Disponible en: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND50000054/PDF>
- Bernal, L., et al., 2007. Efecto de la deficiencia de fósforo en el metabolismo de carbono de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris*). *Agrociencia* 41: 417-423. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/302/30241405/>
- Birouste, M., et al, 2014. Measurement of fine root tissue density: a comparison of three methods reveals the potential of root dry matter content. *Plant and Soil*, Vol. 374, Issue 1-2, pp 299-313. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1874-y>

- Brechelt, A., 2004. Manejo ecológico del suelo. Fundación Agricultura y Medio Ambiente, Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina FAMA/RAPAL. Santiago de Chile. 28 p. 2004. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: http://bioinsumosagric.ucoz.com/_ld/0/90_Manejo_Ecologic.pdf
- Brück, H. y Guo, S., 2006. Influence of N form on growth photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Vol. 169, Issue 6, pages 849-856. Recuperado el día 16 de marzo de 2017. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.200520570>
- Brugnoli, E., y Lauteri, M., 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non-halophytes. *Plant Physiol.* (1991) 95, 628-635. Recuperado el día 18 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.plantphysiol.org/content/95/2/628>
- Bullock, S.H., 2000. Developmental patterns of tree dimensions in a neotropical deciduous forest. *Biotropica* 32(1): 42-52. Recuperado el día 18 de marzo de 2017. Disponible en: [http://www.bioone.org/doi/abs/10.1646/0006-3606\(2000\)032%5B0042:DPOTDI%5D2.0.CO%3B2](http://www.bioone.org/doi/abs/10.1646/0006-3606(2000)032%5B0042:DPOTDI%5D2.0.CO%3B2)
- Burbano-Orjuela, H., 2016. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 33(2):117-124. Recuperado el día 2 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v33n2/v33n2a11.pdf>
- Burrige, J., et al., 2016. Legume shovelomics: high-throughput phenotyping of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* subsp. *unguiculata*) root architecture in the field. *Field Crops Research*, vol.192, pages 21-32. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429016300922>
- Can, A., et al., 2014. Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* Vol.5, no.5. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000500003
- Cantú, M.P., et al., 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencias del suelo* v.25, n.2, Buenos Aires, Argentina. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672007000200008&script=sci_arttext&tlng=en
- Cerón, L., et al. 2012. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Artículo de revisión. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XIV No. 1 Julio 2012 285-295. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/32889>
- Chave, J., et al., 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological applications*. 16(6): 2356-67. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/1051-0761%282006%29016%5B2356%3ARAPVOW%5D2.0.CO%3B2>
- Chen C.R., et al., 2008. Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: A review. *Ecology and Management*. 255: 396–409. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112707008377>
- CIAT, 1986. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Fernández de C., Paul Gepts, Marceliano López. Cali, Colombia. 34 p. Recuperado el día 16 de julio de 2016. Disponible en: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat_digital/CIAT/28093.pdf
- CIAT, 2012. Phenotyping common beans for adaptation to drought: protocol for field evaluation. Polonia J., Rivera M., Rao I. Cali, Colombia: International Center for Tropical Agriculture. Recuperado el día 16 de julio de 2016. Disponible en: https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/41626/field_evaluation_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Comas, L., y Eissenstat, D.M., 2004. Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. *Functional Ecology* 19(3):288-397. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228021774_Linking_fine_root_traits_to_maximum_potential_growth_rate_among_11_mature_temperate_tree_species
- Comas, L.H., et al., 2013. Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442. Recuperado el día 16 de julio de 2016. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00442/full>
- Cornelissen, J., et al. 2003. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335–380. Recuperado el día: 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://doi.org/10.1071/BT02124>

- Cornwell, W. y Ackerly, D., 2009. Community assembly and shifts in plant trait distributions across and environmental gradient in coastal California. *Ecological monographs*, Ecological Society of America. Vol. 79, Issue 1, pages 109-126. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/07-1134.1/full>
- Cortez, J., et al., 2007. Plant traits, litter quality and decomposition in a Mediterranean old-field succession. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-007-9285-6>
- Craine, J.M., 2009. *Resource strategies of wild plants*. Princeton University Press, USA. 298 pp. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=or98NnK10iYC&oi=fnd&pg=PP2&dq=craine+2009+wild+plants&ots=NE4ph-iX-h&sig=x_H7um6v6tgM8-0f5C36Rjhv8_0#v=onepage&q=craine%202009%20wild%20plants&f=false
- De la Cruz, J., et al., 2012. Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, Vol. 6, No.1, pp. 96-109. Recuperado el día 16 de enero de 2018. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v6n1/v6n1a10.pdf>
- Delgado-Salinas, A., 2012. La historia natural del frijol (*Phaseolus*). 7-17. En: *El Frijol- Un regalo de México al mundo*. Fundación Herdez. México, D.F., México. 2012. 108. Recuperado el día 12 de febrero de 2018.
- Department of Plant Science, 2018. Protocolo para la evaluación de verticilos radiculares. PennState College of Agricultural Sciences. Recuperado el día 16 enero de 2018. Disponible en: <http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/metodologia-de-investigacion/protocolo-para-la-evaluacion-de-verticilos-radiculares-whorls>
- Department of Plant Science, 2016. Root System Architecture. Universidad de Ciencias Agrarias de Pensilvania PennState. College of Agricultural Sciences. Department of Plant Science. Recuperado el día 16 de julio de 2016. Disponible en: <http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/projects/root-architecture>
- Díaz, S., et al., 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* 15(3): 295-304. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: [http://www.bioone.org/doi/abs/10.1658/1100-9233\(2004\)015%5B0295:TPTTDE%5D2.0.CO%3B2](http://www.bioone.org/doi/abs/10.1658/1100-9233(2004)015%5B0295:TPTTDE%5D2.0.CO%3B2)
- Domingo, J., et al., 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. *Investigación Agraria: Sistemas de Recursos Forestales*, 15(1), 14-23. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ruben_Villaran/publication/28126722_Estimacion_de_la_capacidad_de_retencion_de_agua_en_el_suelo_revision_del_parametro_CRA/links/0f31753c6c32137c49000000.pdf
- Domínguez, M.T., et al. 2012. Relationships between leaf morphological traits, nutrient concentrations and isotopic signatures for Mediterranean woody plant species and communities. *Plant Soil* 57, 407-424. Recuperado el día 11 de febrero de 2018.
- Etchevers, J.D., 1992. *Manual de métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes*. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Laboratorio de Fertilidad de Suelo y Química Ambiental, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. México.
- FAO, 2005. *Agricultura y diálogo de culturas, nuestro patrimonio común*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Departamento de Servicios Internos, Recursos Humanos y Finanzas. Recuperado el día 23 de enero de 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/008/a0015s/a0015s00.pdf>
- FAO, 2015. Noticias. Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- FAO, 2015b. Noticias. Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Año internacional de los suelos. Suelos sanos para una vida sana. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- FAO, sin año. *Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible*. Manejo de la humedad del suelo. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sm/soil_moisture.pdf
- Fiske, C.H. y Subbarow, Y., 1925. The colorimetric determination of phosphorus. *The Journal of Biological Chemistry*, Vol. 66, No. 2, pages 375-400. Disponible en: <http://www.jbc.org/content/66/2/375.full.pdf>

- Fonseca, W., et al., 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1), 36-47. Recuperado el día 18 de marzo de 2017. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002009000100006
- Fortunel, C., et al. 2012. Leaf, stem and root tissue strategies across 758 Neotropical tree species. *Functional Ecology*, Vol. 26, Issue 5, pages 1153-1161. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2435.2012.02020.x/full>
- Freschet, G.T., et al, 2010. Evidence of the “plant economics spectrum” in a subarctic flora. *Journal of Ecology* 98(2): 362-373. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2745.2009.01615.x/full>
- Fuka, M.M., et al., 2008. Factors influencing variability of proteolytic genes and activities in arable soil. *Soil biology and biochemistry*. Vol. 40, Issue 7, pages 1646-1653. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807170800076X>
- Fyllas, N., et al., 2009. Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soil and climate. *Biogeosciences*, 6: 2677-2708. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.biogeosciences.net/6/2677/2009/>
- Gama, P.B.S., et al., 2007. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *Afr. J. Biotechnol.* 6(2):079-088. Recuperado el día 13 de febrero de 2018. Disponible en: http://www.academicjournals.org/article/article1379772422_Gama%20et%20al.pdf
- Garnier, E., et al., 1999. Relationships between photosynthesis, nitrogen and leaf structure in 14 grass species and their dependence on the basis of expression. *The New Phytologist*, Vol. 143, Issue 1, pp. 119-129. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/new-phytologist/article/relationships-between-photosynthesis-nitrogen-and-leaf-structure-in-14-grass-species-and-their-dependence-on-the-basis-of-expression/7DA07F85543AD663A5C517832FEFBE6B>
- Gobierno municipal, 2012. Programa de desarrollo urbano y ordenamiento ecológico territorial de Valle de Santiago, Guanajuato. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.valledesantiago.gob.mx/implan/ProgramadeDesarrolloUrbanoyOrdenamientoEcologicoTerritorial20132038versionCompleta.pdf>
- Guo, S., et al., 2002. Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Plant and Soil* 239: 267-275. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1015014417018.pdf>
- Gutiérrez, R.M., et al., 2005. Canopy reflectance, stomatal conductance, and yield of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus coccineus* L. under saline field conditions. *Int. J. Agric. Biol.* 7(3):491-494. Recuperado el día 13 de febrero de 2018.
- Hai et al., 2009. Quantification of key genes steering the microbial nitrogen cycle in the rhizosphere of sorghum cultivars in tropical agroecosystems. *Applied and environmental microbiology*. 75(15): 4993-5000. doi:10.1128/AEM.02917-08
- Hassink, J. 1994. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1221-1231.
- Haynes, R., y Naidu, R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 51: 123-137, 1998.
- Ho, M.D., et al., 2005. Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional Plant Biology* 32(8): 737. Recuperado el día 11 de febrero de 2018.
- INAFED, 2005. Enciclopedia de los Municipios de México. San Felipe, Guanajuato. 2005. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Guanajuato. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11030a.html>
- INAFED, sin año(b). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Guanajuato, Municipio Valle de Santiago. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11042a.html>
- INEGI, 1997. El sector agropecuario en el estado de Guanajuato. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/380/702825118457/702825118457_1.pdf

- INEGI, 1998. Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. Recuperado el 11 de diciembre de 2017. Disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222253/702825222253_1.pdf
- INEGI, 2014. Encuesta nacional agropecuaria (ENA). Instituto Nacional de Geografía y Estadística y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Aguascalientes, México, 2014. Recuperado el día 1 de febrero de 2018. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2015/especiales/especiales2015_08_8.pdf
- INEGI. (2009a). Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Valle de Santiago, Guanajuato. Clave geoestadística 11049. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI. (2009b). Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: San Felipe, Guanajuato. Clave geoestadística 11030. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI. (2011). Información geográfica. En: Perspectivas estadísticas de Guanajuato. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Diciembre, 2011.
- INEGI. (2017). Información por entidad: Territorio de Guanajuato. Cuéntame, INEGI. Página en red [<http://www.cuentame.inegi.org.mx>]. Consultado: 19 de abril de 2017.
- INIFAP, 2008. Variedades de frijol para Guanajuato y regiones similares. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro. Recuperado el día 11 de diciembre de 2017. Disponible en: <https://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/fgp/pdf/Frijol/Tripticos/Variedades%20de%20Frijol%20para%20Guanajuato%20y%20regiones%20similares.pdf>
- Julca-Otiniano, A., et al., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. Idesia (Chile) Vol. .24 No.1 49-61, 2006.
- Karlen, D.L., et al., 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. Soil Science Society of America J. 61: 4-10. Recuperado el día 10 de febrero de 2018. Disponible en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/61/1/SS0610010004?access=0&view=pdf>
- King, D.A., et al., 2006. Growth and mortality are related to adult tree size in a Malaysian mixed dipterocarp forest. For. Ecol. Manage. 223:152-158. Recuperado el día 18 de marzo de 2017. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112705006924>
- Laishram, J., et al., 2012. Soil health and soil quality: a review. International Journal of Ecology and Environmental Sciences 38(1): 19-37. Recuperado el día: 11 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/232237296_Soil_quality_and_soil_health_A_review
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. Land Degrad. Develop. 12:519-539 (2001). Recuperado el día 6 de febrero de 2018. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.472/epdf>
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science Vol. 304, Issue 5677, pp. 1623-1627. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/304/5677/1623>
- Lambers, H., et al., 2008. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. Trends in Ecology and Evolution, Vol. 23, Issue 2, pages 95-103. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534707003576>
- Lavorel, S., & Garnier, E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. Functional Ecology, 16(Essay Review), 545-556. Recuperado el día: 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://doi.org/Doi 10.1046/J.1365-2435.2002.00664.X>
- León, F., et al., 1997. Área foliar, longitud de raíces y producción de grano de *Amaranthus hypocondriacus* L. en suelo compactado. Recuperado el día 17 de enero de 2018. Disponible en: http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=s0304-88021997000200005&script=sci_arttext
- Lima, J.D., et al., 1999. Leaf gas Exchange and chlorophyll fluorescence parameters in *Phaseolus vulgaris* as affected by nitrogen and phosphorus deficiency. Photosynthetica, volumen 37, Issue 1, pp 113-121. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007079215683>
- Lynch, J., et al., 1995. La adaptación fisiológica de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a baja disponibilidad de fósforo. En: Araya Villalobos, Rodolfo; Beck, Douglas P. (eds.). Taller Internacional sobre Bajo Fósforo en el Cultivo del Frijol (1995, San José, Costa Rica). Mejoramiento y manejo agronómico del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) para adaptación en suelos de bajo fósforo: Memoria.

- Margaret, N., et al., 2014. Development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production under low soil phosphorus and drought in Sub-Saharan Africa: a review. *Journal of Sustainable Development*; Vol. 7, No. 5. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5539/jsd.v7n5p128>
- Martínez, E., et al., 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, Vol. 8, No. 1, Temuco, Chile, 2008. Recuperado el día 11 de febrero de 2018. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912008000100006
- Martirena-Ramírez, A., et al., 2017. Caracterización morfológica de líneas de *Phaseolus vulgaris* L. en casa de cultivo. *Bioteecnología Vegetal*, Vol. 17, No. 3: 191-201. Recuperado el día 28 de marzo de 2018. Disponible en: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/557/html>
- McMahon, M., y Valdés, A., 2011. Análisis del extensionismo agrícola en México. OCDE julio, 2011. Recuperado el día 31 de enero de 2018. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/EXTENSIONISMO/ESTUDIO%20OCDE%20EXTENSIONISMO.pdf>
- Montoro, Y., et al., 2009. Características de uso de plaguicidas químicos y riesgos para la salud en agricultores del a cierra central del Perú. *Revista peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, Vol. 26, No.4, Lima, oct/dic. 2009. Recuperado el día 24 de enero de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342009000400009&script=sci_arttext
- Moreno, J., et al., 2000. *Fundamentos de Edafología y Climatología*. Editor Universidad Miguel Hernández. España. 395 pp.
- Muñoz, J.D., et al. 2006. The spatial variability of some soil properties and their relationship with varying production in potato crop (*Solanum tuberosum* L.). *Agron. Colomb.* Vol. 24, n.2, pp.355-366. Recuperado el día 25 de enero de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-99652006000200020
- Nannipieri P., Eldor P. 2009. The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components. *Soil Biology and Biochemistry*. 41(12): 2357-2369. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.07.013
- NSW, 2017. Soil degradation. Under how the quality of soil declines and what causes this decline. Office of Environment and Heritage. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.environment.nsw.gov.au/topics/land-and-soil/soil-degradation>
- OCDE, 1993. Core set of indicators for Environmental Performance Reviews. Organization for Economic Co-Operation and Development. *Environment Monographs* No. 83, 1993. Paris, Francia. Recuperado el día 7 de febrero de 2018. Disponible en: <http://enrin.grida.no/htmls/armenia/soe2000/eng/oecdind.pdf>
- PennState College of Agricultural Science, 2017. Department of Plant Science. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/metodologia-de-investigacion/protocolo-para-la-evaluacion-de-verticilos-radiculares-whorls>
- Pérez-Harguindeguy, N., et al, 2013. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61: 167-234. Recuperado el día: 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.publish.csiro.au/BT/bt12225>
- Polanía, J., et al., 2009. Desarrollo y distribución de raíces bajo estrés por sequía en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema de tubos con suelo. *Agron. Colomb.* Vol. 27 No. 1, Bogotá. Recuperado el día 18 de julio de 2018. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-99652009000100004&script=sci_arttext&tlng=pt
- Polanía, J.A., et al., 2012. Características morfo-fisiológicas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionadas con la adaptación a sequía. *Acta Agronómica*, 61(3) 2012, p 197-206.
- Poorter, L., et al., 2008. Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five neotropical forest. *Ecology*. Ecological Society of America, Vol. 89, Issue 7, pages 1908-1920. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/07-0207.1/full>
- PrometheusWiki, 2013. Root-system morphology. *Protocols in ecological and environmental plant physiology*. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://prometheuswiki.org/tiki-index.php?page=Root-system+morphology>
- PrometheusWiki, 2010. Specific Leaf Area, SLA. Mayo, 2010. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://prometheuswiki.org/tiki-citation.php?page=Specific%20Leaf%20Area%20-%20SLA>
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <https://www.r-project.org/>
- Reich, P.B., 2014. The world-wide "fast-low" plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102: 25-301. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2745.12211/full>

- Reich, P.B., et al., 1998. Photosynthesis and respiration rates depend on leaf and root morphology and nitrogen concentration in nine boreal tree species differing in relative growth rate. *Functional Ecology* 12(3): 395-405. Recuperado el día 11 de febrero de 2018.
- Reich, P.B., et al., 1999. Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. *Ecology*. Ecological Society of America, Vol. 80, Issue 6, pages 1955-1969. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/0012-9658\(1999\)080%5B1955:GOLTRA%5D2.0.CO;2/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/0012-9658(1999)080%5B1955:GOLTRA%5D2.0.CO;2/full)
- Reich, P.B., et al., 2003. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences* 164, no. S3:S143-S164. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/374368>
- Roumet, C., et al., 2016. Root structure-function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. *New Phytologist* 210(3): 815-826. Recuperado el 11 de febrero de 2018. Disponible en: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.13828>
- SAGARPA, 2015. Agenda Técnica Agrícola Guanajuato. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Pág. 157-172.
- Salgado-Negret, B., 2015. La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia, 236 pp. recuperado el día 15 julio de 2016. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Juan_Parra11/publication/298344382_Protocolo_para_la_medicion_de_rasgos_funcionales_en_aves/links/56e81dd608ae9aeadbacb00/Protocolo-para-la-medicion-de-rasgos-funcionales-en-aves.pdf
- Sánchez, S., et al., 2011. Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y Forrajes* vol. 34 no. 4 Matanzas sep.-dic. 2011. Recuperado el día 15 de marzo de 2017. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942011000400001
- Sangerman-Jarquín, D.M., 2010. Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* Vol.1, no.3, Texcoco, 2010. Recuperado el día 15 de marzo de 2016. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000300007
- Sans, F.X., 2007. La diversidad de los agroecosistemas. *Ecosistemas*. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente, Vol. 16, No. 1. Recuperado el día 23 de enero de 2018. Disponible en: <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/137>
- Sarandón S., y Flores, C., 2016. Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Capítulo 2 La agroecología: el enfoque necesario para una agricultura sustentable. Recuperado el día: 18 de enero de 2018. Disponible en: <http://centroemmanuel.org/wp-content/uploads/2016/04/Documento-Agroecologia-Sarandon.pdf>
- Schlegel, B., et al., 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestras de biomasa forestal. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Recuperado el día 18 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.uach.cl/proforma/carbono/manmuesbio.PDF>
- SDES, 2010. Indicadores Económicos del Municipio de San Felipe. Gobierno del Estado. Secretaría de Desarrollo Económico Sustentable. Recuperado el día 11 de diciembre de 2017. Disponible en: https://portalsocial.guanajuato.gob.mx/sites/default/files/documentos/2010_SDES_Indicadores%20del%20Municipio%20de%20San%20Felipe.pdf
- SEDEA, sin año. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Secretaría de Desarrollo Agropecuario. Querétaro. Recuperado el día 13 de febrero de 2018. Disponible en: <http://sedea.queretaro.gob.mx/sites/sedea.queretaro.gob.mx/files/FRIJOL.pdf>
- SEDESOL, 2013. Anuario estadístico y geográfico de Guanajuato 2013. Recuperado el día 16 de marzo de 2018. Disponible en: http://seieg.iplaneg.net/seieg/doc/mapas_11_1399910168.pdf
- Segrelles, A., 2001. Problemas ambientales, agricultura y globalización en América Latina. *Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, no. 92 (1 jul. 2001). ISSN 1138-9788. Recuperado el día 24 de enero de 2018. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/2202>
- SEMARNAT y CP, 2003. Evaluación de la degradación de suelos en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Colegio de Postgraduados. Memoria Nacional 2001-2002. México. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf

- Shiple, B. y Vu, T., 2002. Dry matter content as a measure of dry matter concentration in plants and their parts. *New Phytologist*, vol. 153, Issue 2, pages 359-364. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.0028-646X.2001.00320.x/full>
- Shoji, s., et al. 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. 188 p. *Developments in soil science* 21. Elsevier, Amsterdam, The Netherland.
- SIAP, 2016. Panorama Agroalimentario. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Frijol, 2016. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA. Recuperado el día 13 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200638/Panorama_Agroalimentario_Frijol_2016.pdf
- Siebe, C., et al., 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Segunda edición (revisada, corregida y aumentada). 51 p.
- Silva, H., et al., 1999. Efecto del déficit hídrico en la anatomía foliar de seis cultivares de poroto *Phaseolus vulgaris*. *Revista Chilena de Historia Natural* 72: 219-235. Recuperado el día 16 de marzo de 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Herman_Silva/publication/304441027_Silva_H_Martinez_JP_Baginsky_C_Pinto_M_Effects_of_different_frequencies_of_irrigation_on_the_leaf_anatomy_of_different_cultivars_of_common_bean_Phaseolus_vulgaris_L/links/577a7a9c08aece6c20fbd237.pdf
- Simón, M., et al., 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Asociación Argentina Ciencia del Suelo. Cienc. Suelo (Argentina)* 31(1): 45-55.
- Singh, S.P., et al., 1999. Two cycles of recurrent selection for seed yield in common bean. *Crop Sci.* 39: 391-397. Recuperado el día 13 de febrero de 2018. Disponible en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/39/2/CS0390020391>
- SQI- Soil Quality Institute, 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service, USA. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf
- Subbarao, G.V. y Johansen, C., 1994. Potential for genetic improvement in salinity tolerance in Legumes: Pigeon Pea. In: Pessaraki, M. (Ed.). *Handbook of plants and crop stress*. Marcel Dekker, New York. 581-595 pp. Recuperado el día 13 de febrero de 2018.
- Tang, H., et al., 2012. Effects of long-term fertilization on nifH gene diversity in agricultural black soil. *African Journal of Microbiology Research*. 6(11): 2659-2666. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <http://www.academicjournals.org/journal/AJMR/article-abstract/7C7526724846>
- Tarback, E.J., y Lutgens, F.K., 2005. El suelo. *Ciencias de la Tierra*. Octava edición. Pearson Educación, S.A., Madrid, 2005. Páginas consultadas: 186-193.
- Tittonell, P., et al, 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya. An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 123, Issues 1-3, January 2008, pages 137-150. Recuperado el día 25 de enero de 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880907001648>
- USDA, 2009a. Soil Quality Indicators. Earthworms. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- USDA, 2009b. Soil Quality Indicators. Soil respiration. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- USDA, 2010. Soil Quality Indicators. Soil Enzymes. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Recuperado el día 8 de febrero de 2018. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- Valbuena, C.A., et al., 2008. Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.). *Rev. Bras. Frutic.*, p. 1146-1151. Recuperado el día 25 de enero de 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ramon_Giraldo/publication/262760032_Spatial_variability_of_soil_properties_and_yield_relationship_in_a_mango_crop_Mangifera_Indica_L/links/54b544140cf26833efd088ae/Spatial-variability-of-soil-properties-and-yield-relationship-in-a-mango-crop-Mangifera-Indica-L.pdf
- Vandewalle, M., et al. 2010. Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms. *Biodiversity and Conservation*, 19(10), 2921–2947. Recuperado el día: 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s10531-010-9798-9>

- Violle, C., et al., 2007. Let the concept of trait be functional. *Oikos*, Vol. 116, Issue 5, pages 882-892. Recuperado el día 9 de febrero de 2018. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x/full>
- Voisin, 1966. Nuevas leyes científicas en la aplicación de abonos. Edit. Tecnos S.A. Madrid España. P 47.
- Westoby, M., et al., 2002. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33:1, pages 125-159. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452>
- Wright, I.J., et al, 2004. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 428, 821-827. Recuperado el día 15 de julio de 2016. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature02403>
- Wright, I.J., et al., 2001. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low- nutrient habitats. *Functional Ecology*, Vol. 15, Issue 4, Pages 423-434. Recuperado el día 23 de marzo de 2018. Disponible en: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.0269-8463.2001.00542.x>
- Wright, I.J., y Westoby, M., 2002. Leaves at low versus high rainfall: coordination of structure, lifespan and physiology. *New Phytologist* 155(3): 403-416. Recuperado el día 11 de febrero de 2018.

ANEXO 1

En este apartado se muestran los datos de los promedios para las variables de suelo, rasgos funcionales y productividad para cada parcela. Estos se emplearon para realizar los análisis estadísticos del presente trabajo en cada uno de los apartados, cubriendo los objetivos propuestos.

En el Cuadro A1 se muestran los promedios de los rasgos funcionales medidos en las plantas de frijol de nueve parcelas. Para consultar las abreviaturas en los nombres de las variables, su explicación y unidades ver el Cuadro 2.

Cuadro A1. Datos promedio de rasgos funcionales estimados en plantas de frijol en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Clave parcela	Grosor (mm)	Nitrógeno foliar (%)	Fósforo foliar (%)	Biomasa foliar total (g)	SLA (cm ² /g)	LTD (g/cm ³)	LDMC (mg/g)	Porcentaje inversión de biomasa hojas
1	FGS6	0.193	4.478	0.222	8.46	206.181	31.011	198.877	56.311
2	FGS2	0.206	3.91	0.178	6.084	174.175	33.572	239.487	51.375
3	FGS3	0.224	4.466	0.174	6.7758	196.065	26.206	187.573	56.735
4	FGS4	0.248	3.802	0.222	6.8075	224.36	19.001	172.137	66.529
5	FGN1	0.291	3.698	0.25	12.8964	178.643	20.04	214.173	58.279
6	FGN2	0.291	4.074	0.256	16.8257	162.439	23.271	203.429	54.983
7	FGS1	0.217	3.406	0.214	15.1569	213.409	25.196	185.243	53.378
8	FGN4	0.287	4.076	0.308	9.6695	163.567	25.269	214.302	58.989
9	FGS5	0.298	4.204	0.224	5.3379	218.045	16.987	129.723	67.673

ANEXO 1

Continuación Cuadro A1. Datos promedio de rasgos funcionales estimados en plantas de frijol en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Clave parcela	Altura planta (cm)	Diámetro tallo (cm)	Densidad tallo (g/cm ³)	Biomasa tallos total (g)	Porcentaje inversión biomasa tallos	Nitrógeno radical (%)	Fósforo radical (%)	Longitud máx. radical (cm)	Núm. Verticilos	Núm. Raíces basales	Núm. Raíces adventicias	Diámetro raíz (mm)
1	FGS6	104.15	5.4	0.29	5.94	38.13	1.82	0.13	44.05	1.8	4.7	22.1	2.65
2	FGS2	73.08	5.1	0.34	5.56	41.92	1.56	0.10	45.25	2	5.1	27.1	1.73
3	FGS3	74.43	5.1	0.46	4.61	37.47	1.68	0.10	35.48	1.2	4.9	22	2.05
4	FGS4	54.36	5.48	0.29	2.97	27.76	1.74	0.16	24.95	8.4	6.9	11.3	1.78
5	FGN1	57.5	7.33	0.33	7.68	34.51	1.53	0.16	40.22	2.4	4.6	21	2.58
6	FGN2	60.97	8.19	0.35	11.81	38.55	1.46	0.20	35.7	2.6	5.7	14.2	2.73
7	FGS1	92.41	8.01	0.27	11.89	40.82	1.26	0.13	34.09	3.9	7.9	18.8	2.03
8	FGN4	47.35	6.24	0.33	5.27	32.39	2.06	0.21	33.6	2.1	3.9	28.3	2.37
9	FGS5	47.95	4.88	0.28	1.99	24.9	1.77	0.17	31.95	7.9	4.7	17.9	2.01

Continuación Cuadro A1. Datos promedio de rasgos funcionales estimados en plantas de frijol en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Clave parcela	Densidad radical (núm. Raíces/cm)	Densidad siembra (ind/m ²)	Longitud raíces totales (cm)	SRL (cm/g)	Volumen radical (cm ³)	RTD (g/cm ³)	RDMC (mg/g)	SSA (cm ² /g)	Biomasa radical total (g)	Porcentaje inversión biomasa raíces
1	FGS6	18.4	1.69	188.050	3029.26	0.384	0.167	201.139	351.682	0.782	5.56
2	FGS2	18.3	6.5	232.902	3650.779	1.087	0.145	206.609	418.472	0.828	6.708
3	FGS3	19.3	2.66	190.751	3851.891	0.473	0.142	181.987	436.449	0.673	5.791
4	FGS4	19	15.3	145.656	3424.599	0.277	0.174	214.565	346.678	0.589	5.706
5	FGN1	10.5	3.86	271.967	4200.249	0.874	0.116	265.075	448.642	1.572	7.212
6	FGN2	13.4	3.75	361.162	3809.498	1.644	0.093	292.227	423.529	1.965	6.464
7	FGS1	15	NaN	150.569	4744.523	0.285	0.176	181.819	507.331	1.524	5.797
8	FGN4	18.6	6.16	394.487	5354.408	0.815	0.124	185.578	484.529	1.391	8.624
9	FGS5	17.1	15.31	164.346	4966.846	0.209	0.171	165.649	464.652	0.589	7.425

ANEXO 1

En el Cuadro A2 se muestran los promedios de las variables de productividad estimadas en las plantas de frijol de nueve parcelas. Para consultar las abreviaturas en los nombres de las variables y unidades, ver la sección V. Materiales y métodos – Productividad en parcelas de frijol.

Cuadro A2. Datos promedio de variables de productividad estimadas en plantas de frijol en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Clave parcela	Eficiencia producción semilla (# semillas g ⁻¹)	Eficiencia producción vainas (# vainas g ⁻¹)	Índice cosecha (%)	Índice cosecha de vainas (%)	Índice partición vainas (%)	PC1 productividad	PC2 productividad
1	FGS6	2.18	0.696	64.318	80.369	80.029	-3.29	-0.25
2	FGS2	2.184	0.88	53.892	72.557	74.276	1.85	-0.58
3	FGS3	2.404	0.71	57.278	76.114	75.253	-0.67	1.48
4	FGS4	2.02	0.752	60.234	78.235	76.99	-1.26	-0.79
5	FGN1	1.902	0.739	56.369	74.78	75.38	0.45	-0.62
6	FGN2	2.201	0.756	56.654	75.831	74.711	0.01	0.37
7	FGS1	2.163	0.667	51.845	74.494	69.595	1.49	1.91
8	FGN4	2.11	0.754	58.912	76.649	76.859	-0.76	-0.33
9	FGS5	1.801	0.823	53.058	74.643	71.083	2.17	-1.19

ANEXO 1

En el Cuadro A3 se muestran los promedios de las variables edáficas físicas y químicas estimadas en los suelos de nueve parcelas. Para consultar las abreviaturas en los nombres de las variables y unidades ver el Cuadro 5.

Cuadro A3. Datos promedio de variables de suelo estimadas en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Propietario	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	C.E. (μS/cm)	D.A. (g/cm ³)	CMRA (%)	CMRA (L/m ²)
1	FGS6	40	30	30	8.2	441.7	0.9	22.2	65.9
2	FGS2	38	21	41	7.2	592	0.9	22.8	61.5
3	FGS3	39	17	44	7.6	456	0.8	20.6	56.3
4	FGS4	43	31	26	8.1	460.7	0.8	20.9	54.9
5	FGN1	20	41	39	6.4	88.7	1.3	11	32.4
6	FGN2	21	35	44	7.2	137.4	1.2	10.9	31.8
7	FGS1	45	44	11	6.7	380.8	1.1	20.6	59.7
8	FGN4	19	41	40	6.6	148	1.4	11.1	28.4
9	FGS5	43	33	24	8.2	403.5	1	20.8	49.2

Continuación Cuadro A3. Datos promedio de variables de suelo estimadas en nueve parcelas de Guanajuato

Parcela	Propietario	N (%)	N (kg/m ²)	P (ppm)	P (g/cm ²)	C total (%)	C total (Kg/m ²)	PC1 suelo	PC2 suelo
1	FGS6	0.09	0.243	2.772	772.826	1.496	4.028	-1.82	-1.18
2	FGS2	0.136	0.344	3.931	973.126	2.342	5.888	-3.07	1.97
3	FGS3	0.101	0.228	1.603	370.62	1.868	4.221	-1.62	-1.03
4	FGS4	0.14	0.303	0.456	87.064	2.344	5.012	-3.02	0.51
5	FGN1	0.058	0.22	0.279	105.724	0.655	2.477	3.89	-2.28
6	FGN2	0.077	0.27	8.47	3036.18	0.85	2.964	3.49	-0.37
7	FGS1	0.092	0.295	2.955	774.258	1.847	5.9	-1.01	0.77
8	FGN4	0.09	0.326	18.98	7097.172	1.128	4.107	4.7	2.78
9	FGS5	0.105	0.241	1.325	332.624	1.663	3.828	-1.45	-1.8

ANEXO 2

Evaluaciones edafocológicas de suelos agrícolas en Guanajuato

PERFIL No. 1

Sitio: FGS1

Clasificación del suelo: Vertisol

Fecha de descripción: 18 de mayo del 2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°21'42.31

Coordenada Y: 101°24'7.10

Altitud: 1764 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado (3°)

Uso del suelo o vegetación: Cultivo agrícola, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Moderado

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en horizontes subsuperficiales, seco y muy seco pF 4 y 5 en horizontes superficiales.

Presencia de rocas superficiales: 7 por ciento.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un perfil profundo, que tarda en drenar cuando se satura con agua, de color oscuro, uniforme, especialmente si está húmedo, con rocas volcánicas en superficie que han sido removidas y con éstas, se han construido tecorrales que limitan las parcelas agrícolas (en este sitio particularmente aflora una parte del derrame lávico). La estructura es laminar en el primer horizonte, angular en el segundo y es prismática en el tercer horizonte; la estabilidad de los agregados es moderada, y el tamaño de éstos va de gruesos a finos. Su porosidad es mayor en los horizontes superficiales que a profundidad, además posee múltiples grietas. La arcilla dominante en estos suelos es la montmorilonita, una arcilla expandible conformada por dos capas de sílice por una de aluminio. Cuando estas arcillas están secas se contraen y cuando se humedecen se expanden. Cuando están contraídas forman grietas profundas que pueden llegar al subsuelo. Presenta un horizonte Bss que hace referencia a la presencia de facetas de fricción presión (slicken sides) ocasionadas por la contracción-expansión. Las raíces están distribuidas principalmente hasta los 27 cm.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-1.5	Color 5Y 2.5/1; textura arcillo limosa; concentración media de materia orgánica (3%); moderadamente ácido (5.7 en agua); conductividad eléctrica de 307 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado fuerte que rompe a subangular media y fina; compactado, estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad en superficie del 7%; poros intersticiales, comunes, finos, exped, inped; densidad aparente media; densidad de raíces mediana; y límite claro y uniforme.
Ap	1.5-8/11	Color 5Y 2.5/1, textura arcillo limosa; concentración media de materia orgánica (3%); ligeramente ácido (6.1 en agua); conductividad eléctrica de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura angular en bloques gruesos y medios de grado fuerte que rompen a estructura angular media y fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 7% en superficie; poros intersticiales muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja (0.9 g/cm^3); densidad de raíces muy alta; límite claro y uniforme.
Bp	8/11-27	Color 5Y 2.5/1; textura arcillo limosa; concentración media de materia orgánica (2.2%); muy ligeramente ácido (6.8 en agua); conductividad eléctrica de 377 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura prismática gruesa y media que rompe a angular media y fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; con 2% de piedras; poros intersticiales muchos, finos y muy finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta; límite gradual y uniforme.

Bss1	27-40	Color 5Y 3/1; textura arcillo limosa a arcillo arenosa; concentración baja de materia orgánica (2%); ligeramente alcalino (8 en agua); conductividad eléctrica de 389 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura angular en bloques medios, fuertes que rompen a angular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; con 1% de piedras; poros intersticiales, pocos, finos y muy finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos y muy finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces media; límite claro y uniforme.
Bss2	40-61	Color 5Y 3/1; textura arcillo limosa a arcillo arenosa; moderadamente ácido (6 en CaCl_2); estructura angular en bloques medios, fuertes que rompen a angular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; sin piedras; poros intersticiales, pocos, finos y muy finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos y muy finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces baja; límite gradual y uniforme.
CB	61-83	Color 5Y 5/1; textura arcillo limosa a arcillo arenosa; moderadamente ácido (6 en CaCl_2); estructura angular en bloques medios, fuertes que rompen a angular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; con 25% de piedras; poros intersticiales, pocos, finos y muy finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos y muy finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces nula. Ésta es su profundidad total pero la evaluación edafocológica abarca solamente 30 cm.

Procesos pedogenéticos dominantes

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica, la formación de estructura angular y prismática y la formación de facetas de fricción-presión. El pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, por lo que las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

El suelo

La conductividad hidráulica de estos suelos es moderada. Al inicio de la temporada de lluvias estos suelos tardan en humedecerse y la gran cantidad de fracturas que presentan mantienen un buen drenaje, sin embargo conforme avanza la temporada de lluvias el agua se infiltra lentamente, dificultando las actividades en la parcela. En estos suelos el arado debe llevarse a cabo en el momento preciso, cuando el suelo no está saturado de agua (suelo muy pesado), pero tampoco esté muy seco. Sin embargo, a pesar de que tiene una capacidad media de retener agua, el agua que puede ser disponible para las plantas es evaluada como baja, se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias.

Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como regulares, el pH de moderadamente a ligeramente ácido, ocasiona una ligera pérdida de bases por lixiviación. El N total y disponible se evalúan como medios, así como el P disponible.

PERFIL No. 2

Sitio: FGS5

Clasificación del suelo: Pheozem

Fecha de descripción: 28-ago-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°21'31.32"

Coordenada Y: 101°24'49.43"

Altitud: 1732 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Fuertemente inclinado, 7°

Uso del suelo o vegetación: Cultivos agrícolas, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Bueno.

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en los horizontes más profundos, seco (pF 4) en el horizonte superficial.

Presencia de rocas superficiales: 7% de pedregosidad.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (60 cm), con un buen drenaje, de color oscuro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con un 7% de pedregosidad en superficie, aunque muchas de las rocas que originalmente se distribuían sobre el predio han sido empleadas en la construcción de tecorrales que dividen las diferentes parcelas. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados es moderada en todo el perfil y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Las arcillas de tipo montmorilonita están presentes, sin embargo, están mezcladas con arcillas tipo alofano con una capacidad importante de fijar fósforo. Presenta un horizonte Bw característico. Las raíces están distribuidas principalmente hasta los primeros 37 cm.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2	Color 5Y 2.5/1; textura franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (2.5%); muy ligeramente alcalino (7.6 en agua); conductividad eléctrica de 459 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular fina, compactado; conductividad eléctrica de 459 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor que no afecta el crecimiento de los cultivos; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad en superficie del 7%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja; y límite claro y uniforme.
Ap1	2-9/12	Color 5Y 2.5/1; textura arcillo limosa; concentración baja de materia orgánica (2.5%); ligeramente alcalino (8.1 en agua); conductividad eléctrica de 433 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces muy alta; límite claro y uniforme.
Ap2	9/12-37	Color 5Y 2.5/1; textura arcillo arenosa a arcillo limosa; concentración baja de materia orgánica (2.5%); moderadamente alcalino (8.4 en agua); conductividad eléctrica de 385 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 30%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta. Límite gradual y uniforme.
Bw	37-60	Color 5Y 4/1; textura arcillo arenosa; moderadamente alcalino (6 en CaCl_2); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; pedregosidad del 50%; estabilidad de agregados en agua, moderada; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja.

Procesos pedogenéticos dominantes

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica y la formación de estructura subangular. El pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de retener agua a capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo son evaluadas como bajas. El agua se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Es un suelo con poca capacidad para almacenar agua. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como regular, a pesar de que los pHs son alcalinos en todo el perfil. El N total se evalúa medio, el N disponible es bajo y el P disponible también es estimado bajo.

PERFIL No. 3

Sitio: FGS3

Clasificación del suelo: Pheozem

Fecha de descripción: 24-ago-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°21'29.98"

Coordenada Y: 101°24'40.38"

Altitud: 1749 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado 4º

Uso del suelo o vegetación: Cultivos agrícolas, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Bueno.

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en los horizontes más profundos, seco (pF 4) en el horizonte superficial.

Presencia de rocas superficiales: 5% de pedregosidad.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (49 cm), con un buen drenaje, de color oscuro, con un 5% de pedregosidad en superficie, aunque muchas de las rocas que originalmente se distribuían sobre el predio han sido empleadas en la construcción de tecorrales que dividen las diferentes parcelas. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja en la superficie a alta a profundidad, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Las arcillas de tipo montmorilonita están presentes, sin embargo, están mezcladas con arcillas tipo alofano con una capacidad importante de fijar fósforo. Presenta un horizonte Bw característico. Las raíces están distribuidas a lo largo de todo el perfil (49 cm).

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2	Color 5Y 3/1; textura franco arcillosa; concentración media de materia orgánica (3.7%); muy ligeramente ácido (6.8 en agua); estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 5%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped; densidad aparente media; densidad de raíces baja; y límite claro y uniforme.
Ap1	2-7	Color 5Y 3/1; textura arcillo arenosa; concentración media de materia orgánica (3.7%); muy ligeramente ácido (6.8 en agua); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, media; pedregosidad del 5%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta; límite gradual y uniforme.
Ap2	7-22	Color 5Y 3/1; textura arcillo arenosa; concentración media de materia orgánica (3.7%); ligeramente alcalino (7.6 en agua); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, alta; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta.
Bw	22-49	Color 5Y 3/1; textura franco arcillosa; moderadamente alcalino (8.2 en agua); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina y granular; pedregosidad del 20%; estabilidad de agregados en agua, moderada; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces media.

Procesos pedogenéticos dominantes

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica y la formación de estructura subangular. El pH va de muy ligeramente ácido a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al

dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de retener agua a capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo son evaluadas como bajas. El agua se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Es un suelo con poca capacidad para almacenar agua. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias.

Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como regular, los pHs alcalinos se localizan a profundidad. El N total y disponible se valoraron medios, el P disponible es estimado bajo.

PERFIL No. 4

Sitio: FGS2

Clasificación del suelo: Pheozem

Fecha de descripción: 18-mayo-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°22'6.87

Coordenada Y: 101°24'17

Altitud: 1738 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado 8°

Uso del suelo o vegetación: Cultivos agrícolas, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Bueno.

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en los horizontes más profundos, seco y muy seco (pF 4 y 5) en horizontes superficiales.

Presencia de rocas superficiales: 10% de pedregosidad.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (35 cm), con un buen drenaje, de color oscuro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con un 10% de pedregosidad, aunque muchas de las rocas que originalmente se distribuían sobre el predio han sido empleadas en la construcción de tecorrales que dividen las diferentes parcelas. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja a moderada, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Las arcillas de tipo montmorilonita están presentes, sin embargo, están mezcladas con arcillas tipo alofano con una capacidad importante de fijar fósforo. Presenta un horizonte B característico. Las raíces están distribuidas a lo largo de todo el perfil (35 cm).

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-1	Color 5YR 2.5/1; textura arcillo arenosa; concentración medianamente-alto de materia orgánica (4.2%); moderadamente ácido (5 en agua); conductividad eléctrica de 658 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina; compactado, estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 10%; poros intersticiales, comunes, finos, exped, inped; densidad aparente media; densidad de raíces alta; y límite claro y uniforme.
Ap1	1-9	Color 5YR 2.5/1; textura franco arcillosa; concentración media de materia orgánica (2.5%); muy ligeramente alcalino (7.1 en agua); conductividad eléctrica de 642 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad del 10%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces muy alta; límite claro y uniforme.
Ap2	9-23	Color 5Y 3/1; textura arcillo arenosa; concentración media de materia orgánica (2.2%); muy ligeramente alcalino (7.1 en agua); conductividad eléctrica de 676 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura

		subangular en bloques medios de grado fuerte y moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 2%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta.
BC	23-30/40	Color 5Y 3/1; textura franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (2%); moderadamente alcalino (7.9 en agua); conductividad eléctrica de 348 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina y granular; pedregosidad del 30%; estabilidad de agregados en agua, moderada; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta.

Procesos pedogenéticos dominantes.

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica y la formación de estructura subangular. El pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de retener agua a capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo son evaluadas como bajas. El agua se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Es un suelo con poca capacidad para almacenar agua. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como regular, a pesar de que el pH es muy ligeramente alcalino. El N total se valúa medio y el disponible bajo, el P disponible es estimado bajo también.

PERFIL No. 5

Sitio: FGS6

Clasificación del suelo: Pheozem

Fecha de descripción: 17-ago-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°22'6.88"

Coordenada Y: 101°24'2.24"

Altitud: 1734 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado, 4°

Uso del suelo o vegetación: Cultivos agrícolas, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Bueno.

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en los horizontes más profundos, fresco (pF 2) en el horizonte superficial.

Presencia de rocas superficiales: 7% de pedregosidad.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (49 cm), con un buen drenaje, de color oscuro, con un 7% de pedregosidad en superficie. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja en la superficie a moderada a profundidad, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Las arcillas de tipo montmorilonita están presentes, sin embargo, están mezcladas con arcillas tipo alofano con una capacidad importante de fijar fósforo. Presenta un horizonte Bw característico. Las raíces están distribuidas abundantemente hasta los 31 cm de profundidad.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2	Color 5Y 3/1; textura franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (2.4%); ligeramente alcalino (8.2 en agua); conductividad eléctrica de 392 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 7%; poros intersticiales, pocos, finos, exped, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja; y límite claro y uniforme.
Ap1	2- 11/13	Color 5Y 3/1; textura franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (2.4%); ligeramente alcalino (8.2 en agua); conductividad eléctrica de 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado débil que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, moderada; sin pedregosidad; poros intersticiales, comunes, finos y muy finos, exped, inped, tubulares, comunes, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta; límite claro y uniforme.
Ap2	11/13- 31	Color 5Y 3/1; textura arcillo arenosa a arcillo limosa; concentración baja de materia orgánica (2.4%); conductividad eléctrica de $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos ligeramente alcalino (7.6 en agua); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, alta; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces alta.
Bw	31- 45/49	Color 5Y 3/1; textura arcillo limosa; moderadamente alcalino (6 en CaCl_2); estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fino; pedregosidad del 3%; estabilidad de agregados en agua, baja; poros intersticiales, pocos, muy finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja.

Procesos pedogenéticos dominantes

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica y la formación de estructura subangular. El pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo son evaluadas como bajas. Es un suelo con poca capacidad para almacenar agua. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutricional las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como medias, los pHs alcalinos se localizan en todo el perfil. El N total es evaluado bajo y el N disponible se valuó bajo, el P disponible es estimado mediano.

PERFIL No. 6

Sitio: FGS4

Clasificación del suelo: Leptosol

Fecha de descripción: 28-agosto-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Guarapo, Guanajuato

Coordenada X: 20°21'33.32"

Coordenada Y: 101°24'48.23"

Altitud: 1732 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado, 3°

Uso del suelo o vegetación: Cultivos agrícolas, originalmente este sitio estaba cubierto por una selva baja caducifolia.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Cenizas volcánicas

Drenaje natural: Bueno.

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en los horizontes más profundos y seco (pF 4) en horizontes superficial.

Presencia de rocas superficiales: 5% de pedregosidad.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo somero (27 cm), con un buen drenaje, de color oscuro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con un 5% de pedregosidad. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja a moderada, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Las arcillas de tipo montmorilonita están presentes, sin embargo, están mezcladas con arcillas tipo alofano con una capacidad importante de fijar fósforo. Carecen de un horizonte B característico. Las raíces están distribuidas principalmente hasta los 12 cm.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2	Color 5Y 2.5/1; textura franco arcillosa; concentración media de materia orgánica (3.5%); ligeramente alcalino (7.9 en agua); conductividad eléctrica de 634 $\mu\text{S}/\text{cm}$, no afecta el crecimiento de cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina; compactado, estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 5%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja; y límite claro y uniforme.
Ap1	2-12	Color 5YR 2.5/1; textura arcillo arenosa; concentración media de materia orgánica (3.5%); moderadamente alcalino (8.1 en agua); conductividad eléctrica de 481 $\mu\text{S}/\text{cm}$, no afecta el crecimiento de cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina y granular; estabilidad de agregados en agua, media; pedregosidad del 2%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces muy alta; límite claro y uniforme.
Ap2	12-27	Color 5Y 3/1; textura arcillo limosa; concentración media de materia orgánica (3.5%); moderadamente alcalino (8.1 en agua); conductividad eléctrica de 423 $\mu\text{S}/\text{cm}$, no afecta el crecimiento de cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; estabilidad de agregados en agua, media; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente baja; densidad de raíces baja.

Procesos pedogenéticos dominantes

Guarapo se localiza en el Campo volcánico Michoacán-Guanajuato, por lo que el material parental de los suelos está conformado por cenizas volcánicas que han sido intemperizadas. Este perfil es somero, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica y la formación de estructura subangular. El pH va de ligeramente a moderadamente alcalino.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de este suelo es alta. Su capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo son evaluadas como bajas. El agua se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Es un suelo con poca capacidad para almacenar agua por ser muy somero. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como muy alta, debido a los pHs alcalinos. Sin embargo una parte importante de éstas no están disponibles para las plantas debido a su pH alcalino. El N total y el disponible se evalúan medios, el P disponible es estimado bajo.

PERFIL No. 7

Sitio: FGN1

Clasificación del suelo: Cambisol

Fecha de descripción: 19-mayo-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: El Alto, San Felipe, Guanajuato

Coordenada X: 21°21'20.29

Coordenada Y: 101°3'21.04

Altitud: 2063 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado (4°)

Uso del suelo o vegetación: Cultivo agrícola, originalmente esta parcela estaba cubierta por un matorral xerófilo.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Materiales sedimentarios y rocas volcánicas transportadas.

Drenaje natural: Bueno

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en horizontes subsuperficiales, seco y muy seco (pF 4 y 5) en horizontes superficiales.

Presencia de rocas superficiales: 3%.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (55 cm), con buen drenaje, de color café claro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con poca pedregosidad (3%). La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja a mediana, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Presenta una mezcla de arcillas sin haber una dominante. Presenta un horizonte Bw, indicando que el material parental ha sido intemperizado. Las densidades altas de las raíces alcanzan hasta los 45 cm de profundidad.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2.3	Color 7.5YR 4/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.7%); ligeramente ácido (6.2 en agua); conductividad eléctrica de 40 μ S/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 3%; poros intersticiales, comunes, finos, exped, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta; y límite claro y uniforme.
Ap1	2.3-12/14	Color 7.5YR 4/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.6%); muy ligeramente ácido (6.6 en agua); conductividad eléctrica de 59 μ S/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques gruesos y medios de grado moderado que rompen a subangular media y fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces muy alta; límite claro y uniforme.
Ap2	12/14-28	Color 7.5YR 4/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.7%); ligeramente ácido (6.2 en agua); conductividad eléctrica de 110 μ S/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina y granular; pedregosidad del 2%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta.
Bw	28/-41/45	Color 7.5YR 5/3; textura franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (1.5%); ligeramente ácido (6.2 en agua); conductividad eléctrica de 43 μ S/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado fuerte que rompen a subangular fina; pedregosidad del 1%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente media; densidad de raíces alta.
Bw2	41/45-55	Color 7.5YR 6/3; textura arcillo arenosa; ligeramente ácido (6 en CaCl_2); estructura subangular en bloques medios de grado fuerte que rompen a subangular fina; pedregosidad del 1%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente media; densidad de raíces baja. Ésta es su profundidad total pero la evaluación edafocológica abarca solamente 30 cm.

Procesos pedogenéticos dominantes

El material parental que dio origen a estos suelos es sedimentario mezclado con algunas rocas volcánicas transportadas por los ríos. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica, la formación de estructura subangular y la formación de un horizonte Bw, lo cual indica que el material parental ha sido intemperizado.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo es evaluada como muy baja; el agua se localiza en poros finos que retienen el agua a altas presiones por lo que las raíces de las plantas no tienen la capacidad de aprovecharla. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias.

Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como muy bajas, el pH de estos suelos promueve ligeramente la lixiviación de éstas. El N total se valúa medio y el disponible bajo, es P disponible es estimado bajo también.

PERFIL No. 8

Sitio: FGN2

Clasificación del suelo: Cambisol

Fecha de descripción: 3-septiembre-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: El Alto, San Felipe, Guanajuato

Coordenada X: 21°21'18.53"

Coordenada Y: 101° 3'24.27"

Altitud: 2069 msnm

Posición fisiográfica: Ladera de pie de monte

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Moderadamente inclinado (3°)

Uso del suelo o vegetación: Cultivo agrícola, originalmente esta parcela estaba cubierta por un matorral xerófilo.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Materiales sedimentarios y rocas volcánicas transportadas.

Drenaje natural: Bueno

Condiciones de humedad del perfil: Fresco pF 3 en horizontes subsuperficiales, y seco (pF 4) en horizontes superficiales.

Presencia de rocas superficiales: 7%.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (46 cm), con buen drenaje, de color café claro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con poca pedregosidad en superficie (7%). La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados va de baja a alta, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Presenta una mezcla de arcillas sin haber una dominante. Presenta un horizonte Bw, indicando que el material parental ha sido intemperizado. Las densidades altas de las raíces alcanzan hasta los 24 cm de profundidad.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-1.5	Color 7.5YR 4/2; textura franca; concentración muy baja de materia orgánica (1.3%); muy ligeramente alcalino (7.3 en agua); conductividad eléctrica de 53 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad en superficie del 3%; poros intersticiales, comunes, finos, exped, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta; y límite claro y uniforme.
Ap1	1.5-12	Color 7.5YR 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.8%); muy ligeramente alcalino (7.1 en agua); conductividad eléctrica de 75 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques gruesos y medios de grado moderado que rompen a subangular media y fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, baja; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta; límite claro y uniforme.
Ap2	12-24	Color 7.5Y 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (2%); muy ligeramente alcalino (7.2 en agua); conductividad eléctrica de 141 µS/cm, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina y granular; pedregosidad del

		2%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta.
Bw	24/-46	Color 7.5YR 4/2; textura franco arcillo limosa a franco arcillosa; concentración baja de materia orgánica (1.5%); ligeramente ácido (6.2 en agua); conductividad eléctrica de 259 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado fuerte que rompen a subangular fina; pedregosidad del 2%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente media; densidad de raíces media.

Procesos pedogenéticos dominantes

El material parental que dio origen a estos suelos es sedimentario mezclado con algunas rocas volcánicas transportadas por los ríos. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica, la formación de estructura subangular y la formación de un horizonte Bw, lo cual indica que el material parental ha sido intemperizado.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de retener agua a capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad), así como el agua disponible a capacidad de campo es evaluada como muy baja. Esto último limita su uso potencial para fines agrícolas a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como muy bajas. El N total se valúa medio y el disponible bajo, es P disponible es estimado bajo también.

PERFIL No. 9

Sitio: FGN4

Clasificación del suelo: Fluvisol

Fecha de descripción: 1-sep-2016

Autor: Víctor Manuel Peña Ramírez

Localización: Capillas, San Felipe, Guanajuato

Coordenadas X: 21°20'8.74

Coordenadas Y: 101°7'26.27

Altitud: 2031 msnm

Posición fisiográfica: Valle

Forma del terreno circundante: Montañoso

Pendiente: Casi plano

Uso del suelo o vegetación: Cultivo agrícola, originalmente era un matorral xerófilo.

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material parental: Materiales sedimentarios

Drenaje natural: Bueno

Condiciones de humedad del perfil: Húmedo (pF 2) en horizontes subsuperficiales, y fresco en los subsuperficiales.

Presencia de rocas superficiales: 10%.

Evidencias de erosión: Laminar

DESCRIPCIÓN BREVE DEL PERFIL

Se trata de un suelo medianamente profundo (37 cm), con buen drenaje, de color café claro, uniforme en apariencia especialmente si está húmedo, con 10% de pedregosidad en superficie. La estructura es laminar en el primer horizonte, y subangular en el resto del perfil; la estabilidad de los agregados es moderada en todos los horizontes, y el tamaño de los agregados va de medios a finos. Es un perfil poroso. Presenta una mezcla de arcillas sin haber una dominante. Carece de horizonte B. Las densidades altas de las raíces alcanzan hasta los 24 cm de profundidad.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

HOR	PROF cm	CARACTERÍSTICAS
Costra	0-2	Color 7.5YR 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.8%); muy ligeramente ácido (6.7 en agua); conductividad eléctrica de 74 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos;

		estructura laminar de grado moderado, que rompe a subangular media y fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad en superficie del 10%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped; tubulares, finos, pocos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces baja; y límite claro y uniforme.
Ap1	2-15	Color 7.5YR 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.8%); ligeramente ácido (6.2 en agua); conductividad eléctrica de 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina, y granular; estabilidad de agregados en agua, moderada; pedregosidad del 5%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente mediana; densidad de raíces alta; límite claro y uniforme.
Ap2	15/24	Color 7.5Y 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.8%); muy ligeramente ácido (6.9 en agua); conductividad eléctrica de 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; pedregosidad del 3%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped, tubulares, pocos, finos, inped; densidad aparente alta; densidad de raíces alta. Límite claro y uniforme.
Cw	24-37	Color 7.5YR 3/2; textura franca; concentración baja de materia orgánica (1.8%); muy ligeramente alcalino (7.1 en agua); conductividad eléctrica de 67 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que no afecta el crecimiento de los cultivos; estructura subangular en bloques medios de grado moderado que rompen a subangular fina; pedregosidad del 50%; poros intersticiales, muchos, finos, exped, inped; densidad aparente alta; densidad de raíces mediana.

Procesos pedogenéticos dominantes

El material parental que dio origen a estos suelos es sedimentario mezclado con algunas rocas volcánicas transportadas por los ríos. Este perfil es medianamente profundo, los principales procesos pedogenéticos son: la acumulación de la materia orgánica, la formación de estructura subangular.

Características ecológicas

Este suelo presenta en la superficie una costra que es una lámina que ha perdido su porosidad como resultado de la erosión. Los suelos se degradan por la pérdida de la materia orgánica y la fragmentación que ocasiona el paso del arado. Además, al dejar el suelo expuesto a la intemperie, las gotas de lluvia impactan los agregados destruyéndolos. Las partículas más finas taponan los poros, lo que disminuye la filtración del agua, por lo que el agua fluye lateralmente hacia las micro-hondonadas o surcos. El suelo pierde la capacidad de almacenar agua, lo cual puede afectar el crecimiento de los cultivos al generar un déficit hídrico. Si esta capa aumenta de espesor puede afectar la germinación de las semillas.

La conductividad hidráulica de estos suelos es alta. Su capacidad de campo (agua retenida contra la gravedad) y el agua disponible a capacidad de campo se evalúan como bajas; Su uso potencial para fines agrícolas se limita a la temporada de lluvias. Desde el punto de vista nutrimental las bases intercambiables (K, Ca y Mg) se evalúan como muy bajas, el pH de estos suelos promueve ligeramente la lixiviación de éstas. El N total se valúa medio y el disponible bajo, es P disponible es estimado bajo también.