



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA

ESTADO NUTRICIONAL DE NITRÓGENO EN *Lupinus* spp. Y SU RELACIÓN
CON N-TOTAL DEL SUELO EN EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-
POPOCATÉPETL Y SU ZONA INFLUENCIA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA
PRESENTA:
SELENE GONZÁLEZ RUIZ

JURADO DE EXAMEN

DIRECTOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES
ASESOR EXTERNO: DRA. KALINA BERMÚDEZ TORRES
ASESOR: M. en C. JUAN MANUEL VALDERRÁBANO GÓMEZ
ASESOR: M. en C. MARICELA ARTEAGA MEJÍA
ASESOR: DR. JORGE ANTONIO VALDIVIA ANISTRO



Febrero, 2024

Ciudad de México, México.

Proyecto CONACyT CB A1-S-3463



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** por la oportunidad y apoyo durante el desarrollo profesional en la carrera de Biología.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo para realizar este proyecto **CONACyT CB A1-S-34633**

A los laboratorios que me abrieron la puerta durante la formación como Bióloga. Con mucho cariño a Jordy Molina, por el trabajo, apoyo y amistad durante este periodo.

A la educación gratuita y a las instituciones de educación pública en las que estudié.

Al laboratorio de Tecnología Ambiental y a los maestros, amigos y compañeros que me acompañaron en el último año de la carrera.

A las instituciones que me han permitido ejercer como Bióloga. A la PROFEPA y al HRAEI, así como a la Ing. Concepción Ruiz, al Biól. José Luis Luna, a la Dra. Mónica Sierra por la confianza y apoyo.

A mis sinodales, M. en C. Juan Manuel Valderrábano, Dr. Jorge Antonio Valdivia Anistro, Mtra Maricela Arteaga Mejía, Dra. Kalina Bermúdez y al Dr. Gerardo Cruz Flores por su apoyo y observaciones para mejorar este trabajo.

A todos los maestros de la carrera de Biología que me ayudaron durante este periodo de formación, especialmente al Mtro. José Luis, a la Mtra. Alma Bella, a la Mtra. Guadalupe Bibriesca por el apoyo y la amistad durante la carrera.

A la Mtra. Maricela Arteaga Mejía. Por ser mi maestra y apasionarme más por la Biología, por brindar su amistad, por todo lo enseñado como Bióloga y más aún como persona, por los consejos dados que atesoro.

¡GRACIAS!

Al Dr. Gerardo Cruz Flores. Mi maestro, gracias por recibirme y apoyarme en este proyecto, por el respeto, las clases, los consejos, por transmitirme sus conocimientos con tanta paciencia y también por las clases de literatura durante las charlas de amistad.

¡GRACIAS!

A la vida:
GRACIAS
por permitirme continuar.

*La persona más influyente en mi vida no es científica sino el hijo de un carpintero.
Marcos 6:3*

Con mucho amor a mis padres

Antonio González Mendiola

Adela Ruiz Samaniego

DEDICATORIAS

ANTONIO GONZÁLEZ MENDIOLA, te admiro mucho, pá. Gracias por ser incondicional, por ser mi fortaleza, por todos los consejos y las mil maneras en las que nos dices “te amo” sin decirlo. Creo que heredé esas imparables ganas tuyas de trabajar. Te amo.

*Si por algún motivo Restauero se cerrara abriríamos una panadería
o cualquier otro negocio
no importa lo que hagamos, seríamos los mejores.*

*En cualquier trabajo, hay que ser el mejor.
(Manuel Serrano Cabrera)*

ADELA RUIZ SAMANIEGO, mamita hermosa. Dios me dio el regalo maravilloso de tenerte como mamá y aprender de ti. Gracias por permitirme conocerte en esta vida, por ayudarme con las tareas, las exposiciones, las lecturas y los “no puedo” durante todos estos años. Te veo y eres una mujer valiente, inteligente y maravillosa, con orgullo digo que me parezco a ti (¡si pude!).

*Tu corazón noble enriquece la vida,
mi vida,
me hace más humana, sensible y empática.
Te amo, mami.*

PONER RIQUEZAS EN MI ENTENDIMIENTO
*Sor Juana Inés de la Cruz
(Fragmento)*

*Yo no estimo tesoros ni riquezas,
y así siempre me causa más contento
poner riquezas en mi entendimiento
que no mi entendimiento en las riquezas.*

Gracias infinitas, amados padres, este trabajo es suyo.

A mis hermanos,
Paty, ojitos bonitos. Gracias por permitirme llegar hasta aquí, por ser mi amiga, mi compañera de vida. Te amo.

*La educación es un acto de amor y, por tanto un acto de valentía.
(Paulo Freire)*

A Emiliano, el mejor regalo de año nuevo. Gracias por ser el mejor hermano y amigo para mí y para Nini. Te admiro por ser tan apasionado y aferrarte a tu motivación, aprovecha todas las oportunidades de la vida. Te amo, Emi.

*Music is like cooking for me, you mix the ingredients together in one big pan and see how they end up. Through experimenting, you find what you really like and stick with it.
(Jacob Collier)*

Con un amor profundo a DENISSE:

Me siento la mujer más afortunada al verte crecer con tanta inocencia e imaginación que te caracteriza, soy bendecida al compartir contigo esta vida. Eres mi mayor alegría. Siéntete orgullosa y haz lo correcto en todo momento, si te equivocas inténtalo otra vez sin olvidar disfrutar el proceso. ¡Lo logramos! esto también es tuyo. **TE AMO.**

A mi nueva familia,

Carlos Macías (hermano) y Paulo Macías (mi hijo-sobrino). Gracias por apoyarme, cuidarnos y estar en todo momento. Disfruto mucho compartir con ustedes a Pia. **Los amo.**

Con mucho amor y agradecimiento a Lourdes Ruiz Samaniego y José Luis Cruz, por el cariño y el apoyo que siempre nos brindan. Dios nos bendice con ustedes.

A los buenos amigos que hice en la FES Zaragoza. Bryan, Vianey, Andrea, Jordy, Michel, Angelica, Valeria, Ariel, Sergio, Acho, Sergio G., Sergio R., Pabel, Diana y Adolfo gracias por acompañarme y brindarme su amistad durante esta maravillosa etapa.

A mis amigos de la vida, Roberto, Marija, Alan y Verónica. Gracias por el apoyo y la compañía.

A mis maestros,

Gaby, Pedro Pablo, Uberaya, Poncho y Selene. Maestros, atesoro en mi mente y corazón lo enseñado y aprendido, GRACIAS por tanto.

A todas las personas que no pude y hubiese querido ayudar, RIP.

Tabla de contenido

Resumen	1
Introducción	3
Antecedentes	6
Marco teórico	8
Descripción del suelo.....	8
Fertilidad del suelo.....	13
Indicadores físicos.....	16
Indicadores químicos.....	18
Indicadores biológicos.....	21
Mecanismos de absorción de nutrientes a través de la raíz	23
El ciclo del carbono en la relación suelo-planta.....	26
El ciclo del nitrógeno en la relación suelo-planta	30
El ciclo del fósforo en la relación suelo-planta	37
Eficiencia nutricional de los nutrimentos en las plantas.....	41
Diagnóstico del Nitrógeno en la nutrición vegetal.....	44
Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.....	48
Justificación de la investigación	51
Objetivos	52
General	52
Particulares	52
Pregunta de investigación	53
Hipótesis	53
Diagrama de flujo	54
Descripción de la zona de estudio	55
Materiales y métodos	56
Colecta y manejo del material vegetal	57
Colecta y manejo de muestras de suelo.....	58
Colecta de ejemplares para determinación de las especies.....	58
Análisis de suelo.....	59
Fase de gabinete	60
Análisis químico de tejido vegetal	61
Análisis estadístico	61
Resultados y discusión	62
Descripción ecológica de los sitios de estudio.....	62

<i>Estado nutricional del género <i>Lupinus</i> y su relación con el suelo.....</i>	75
El pH, como variable maestra, de los suelos donde se establece.....	75
Materia y carbono orgánicos, nitrógeno total y fósforo disponible del suelo donde se establece <i>Lupinus</i>	78
Cationes intercambiables en los suelos donde se estableció <i>Lupinus</i>	82
Descripción general de propiedades de suelos, sobre un gradiente altitudinal, donde se desarrolla <i>Lupinus</i> en el PNI-P y su zona de influencia	96
Propiedades físicas de los suelos donde se establece el género <i>Lupinus</i>	101
Propiedades químicas de los suelos donde se establece <i>Lupinus</i>	105
Materia y Carbono orgánicos del suelo donde se estableció <i>Lupinus</i>	108
<i>Conclusiones</i>	114
<i>Referencias</i>	116
<i>ANEXOS</i>	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos, fuente de energía y capacidad biológica de fijación de N ₂ en suelos bajo leguminosas noduladas, como las del género <i>Lupinus</i> . Modificado de Cruz-Flores, 2006.	6
Figura 2. Gráfico de pastel donde se muestra la porción de compuestos más importantes del suelo. Tomado y modificado de White, 2006.	9
Figura 3. Triángulo textural. Obtenido de fao.org	9
Figura 4. Perfil del suelo, pedión, polipedón y pedopaisaje. Boul et al., 1997.	10
Figura 5. Principales indicadores de la calidad del suelo. Modificado de Ochoa et al., 2007.	13
Figura 6. Relaciones y factores que influyen en la fertilidad del suelo. Modificado de Etchevers, 2000, tomado de Astier et al., 2002.	14
Figura 7. Enlaces temporales entre partículas cuya desaparición puede provocar el colapso. Tomado de https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/suelos-expansivos-colapsables/	17
Figura 8. Las partículas de arcilla y moléculas orgánicas presentan una carga residual negativa sobre su superficie, por lo que son intercambiadores catiónicos https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/30/66696	19
Figura 9. Representación del complejo de cambio en el suelo cuando es saturado con KCl donde se observa el intercambio del catión K ⁺ por el H ⁺ . Tomado y modificado de Soriano, 2018.	19
Figura 10. Tabla que muestra la solubilidad de nutrientes según el pH activo del suelo, siendo más solubles entre 6 y 7. Tomado de https://aefa-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/clasificacion-del-pH/clasificacion-del-pH	20
Figura 11. a) Presentación esquemática de los principales mecanismos de adquisición nutrimental por las raíces de las plantas, b) Interacciones entre la solución y los absorbidos a coloides con las células radicales. Cruz-Flores, 2006.	24
Figura 12. a) La ecuación muestra como el carbonato y el silicato actúa para disolver el calcio produciendo por una molécula de CO ₂ proporcionando un mecanismo en la eliminación del CO ₂ atmosférico b) Fotosíntesis. Tomado y modificado de Dolman, 2019.	27
Figura 13. a) Nódulos de la raíz de <i>Lupinus</i> que muestra la presencia de microorganismos simbióticos de <i>Bradyrhizobium</i> . (Megías et al., 2018). b) Corte transversal de la raíz de <i>Lupinus</i> donde se aprecia el cilindro vascular (xilema y floema) así como el córtex.	32
Figura 14. Resumen de las transformaciones biogeoquímicas del N esperadas en las reacciones redox. Tomado y modificado de Dontsova et al, 2020.	33
Figura 15. Rutas que sintetizan la absorción, asimilación, movilización y transporte del nitrógeno a través de la planta. Tomado y modificado de Azcón-Bieto & Talon, 2008.	34
Figura 16. Regulación diferencial de la síntesis de glutamina y de asparragina por la disponibilidad de carbono y nitrógeno reducido. Tomado de Azcón-Bieto & Talon, 2008.	35
Figura 17. Nucleótido esencial para la obtención de energía compuesta por grupos fosfatos que son importantes en la estructura del nucleótido para la obtención de la energía en la célula. Tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Adenos%C3%ADn_trifosfato	39
Figura 18. Las raíces de las plantas superiores fijan fósforo a través de ellas y a mayor formación de raíces secundarias, mayor es la superficie de contacto en la búsqueda de alimento. Modificado de Espinoza-Barrera & Chávez-Sahagún, 2019.	39
Figura 19. Consideraciones para el diagnóstico visual de los nutrimentos (Modificado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009)	42
Figura 20. Clorosis, Síntoma de deficiencia de nitrógeno en hojas de una planta adulta de maíz donde se nota el color amarillento en forma de V (Tomado de Sharma & Kumar, 2011).	44
Figura 21. Hoja de maíz donde se muestra en las hojas el síntoma de deficiencia de P, márgenes rojizos y necrosis al final (Tomado de Sharma y Kumar, 2011).	46
Figura 22. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (CONANP, 2013).	55
Figura 23. Sitio nombrado “La Joya”. Se muestra el diseño de muestreo para la colecta de ejemplares de <i>Lupinus</i>	57
Figura 24. <i>Lupinus</i> en el sitio La Ranita.	63
Figura 25. Paisajes del valle de “La joya” y flor de <i>Lupinus montanus</i>	64
Figura 26. Flor de <i>Lupinus montanus</i> y paisaje de “Paso de Cortés”.	65
Figura 27. Flor de <i>Lupinus aschenbornii</i> y vegetación de la zona.	66

Figura 28. Sitio el potrero donde se encontró el establecimiento de <i>Lupinus bilineatus</i> entre el rastrojo de las parcelas.	67
Figura 29. Camino que conecta al pueblo de Xalitzintla.	68
Figura 30. Perfil altitudinal de vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Anexas. <i>Pinus sp.</i> es el género con mayor frecuencia entre los sitios que se establecieron las colonias del género <i>Lupinus</i> . Tomado y modificado de Cruz-Flores, 2006.	73
Figura 31. Comportamiento de las mediciones de pH en agua (activo), en CaCl ₂ y la diferencia entre ellos (Δ pH), ordenados de mayor a menor altitud.	76
Figura 32. Porcentaje de MOS, a diferentes profundidades, en los suelos donde se establece <i>Lupinus</i> comparado con los sitios homólogos donde no se establece este género.	78
Figura 33. Comportamiento del Nitrógeno-total de los suelos donde se estableció <i>Lupinus</i> y donde no se estableció.	79
Figura 34. Comportamiento del fósforo disponible en los suelos tipo (donde se estableció <i>Lupinus</i>) y los suelos homólogos (donde no se estableció <i>Lupinus</i>).	80
Figura 35. Cationes intercambiables para los sitios donde se avistó <i>Lupinus</i>	83
Figura 36. Capacidad de intercambio catiónico para los sitios donde se estableció <i>Lupinus</i>	83
Figura 37. Patrones de las relaciones entre los cationes intercambiables de los suelos superficiales donde se estableció <i>Lupinus</i>	84
Figura 38. Partición de masa vegetal fresca para el género <i>Lupinus</i>	86
Figura 39. Partición de masa peso seco de los órganos vegetales en <i>Lupinus</i>	87
Figura 40. Partición de masa de las especies que se establecen en los sitios tipo y homólogos ordenados de mayor a menor altitud.	90
Figura 41. Acumulación de los gramos por kilogramos en biomasa por nitrógeno acumulado por parte.	91
Figura 42. Acumulación de nitrógeno por kilogramo de planta por órgano en las especies registradas en los diferentes sitios donde se registró el establecimiento del género <i>Lupinus</i>	92
Figura 43. Contenido de fósforo en flores de <i>Lupinus</i>	95
Figura 44. Mapa 1. Sitios donde se encontró el registro del género <i>Lupinus</i> en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, además de la marca de una zona buffer de cada sitio.	99
Figura 45. Agrupación de las zonas estudiadas de acuerdo a la ubicación con respecto al parque, exposición, altitud y avistamiento del género <i>Lupinus</i>	100
Figura 46. Fracciones separatas en el suelo representado por grupo.	101
Figura 47. Rango intercuartílico entre los porcentajes de espacio poroso en los grupos donde se establece <i>Lupinus</i>	102
Figura 48. Densidad aparente para los cinco grupos donde se encuentra <i>Lupinus</i>	102
Figura 49. Distribución altitudinal del pH activo.	105
Figura 50. Distribución de los datos por grupo de los valores encontrados de delta pH.	106
Figura 51. Conductividades eléctricas de los grupos de suelo.	106
Figura 52. Distribución de los datos por grupo para materia orgánica.	108
Figura 53. Distribución de los datos de nitrógeno en los cinco grupos de suelo.	109
Figura 54. Medidas de tendencia central para los valores de fósforo por cada grupo.	109
Figura 55. Medidas de tendencia central para la relación C:N presentes en los grupos de suelos.	111

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Características de los principales horizontes del suelo tipo (Tomado y modificado de Buol et al., 1997 y Cruz-Flores, 2006).</i>	12
<i>Cuadro 2. Indicadores físicos de la calidad del suelo (Modificado de García et al., 2012).</i>	16
<i>Cuadro 3. Indicadores químicos de la calidad del suelo (Modificado de García et al., 2012).</i>	18
<i>Cuadro 4. Indicadores biológicos de la calidad del suelo (Modificado de García et al., 2012).</i>	21
<i>Cuadro 5. Función del nitrógeno como macronutriente en las plantas superiores. Tomado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009.</i>	44
<i>Cuadro 6. Guía general para el criterio de rango de los niveles críticos (deficiencia), suficiencia y toxicidad de los nutrientes vegetales. Adaptado de Correndo & García, 2012.</i>	45
<i>Cuadro 7. Rangos de suficiencia de nitrógeno en diferentes cultivos. Adaptado de Correndo & García, 2012.</i>	45
<i>Cuadro 8. Funciones del fósforo como macronutriente en las plantas superiores. Tomado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009.</i>	46
<i>Cuadro 9. Métodos para determinar parámetros edáficos.</i>	59
<i>Cuadro 10. Información obtenida de las bases de datos de los trabajos con registro en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.</i>	60
<i>Cuadro 11. Métodos realizados en el análisis foliar.</i>	61
<i>Cuadro 12. Sitios de estudio en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su zona de influencia.</i>	69
<i>Cuadro 13. Detalle del muestreo para el diagnóstico en tejido vegetal de las especies de Lupinus reportadas.</i>	70
<i>Cuadro 14. Especies herbáceas determinadas en los sitios tipo y homólogos.</i>	71
<i>Cuadro 15. pH y Conductividad eléctrica de los sitios tipo y sus homólogos en el suelo donde se avistó el género Lupinus.</i>	77
<i>Cuadro 16. Contenido del porcentaje de Carbono y Nitrógeno así como del Fósforo disponible en el suelo donde se estableció Lupinus y los sitios homólogos.</i>	81
<i>Cuadro 17. Cationes intercambiables de los suelos donde se avistó el género Lupinus.</i>	82
<i>Cuadro 18. Relación entre cationes intercambiables de los suelos superficiales donde se estableció el género Lupinus.</i>	85
<i>Cuadro 19. Partición de biomasa en especies de crecen en comunidad con Lupinus.</i>	88
<i>Cuadro 20. Acumulación de gramos por kilogramo de nitrógeno por órgano en el género Lupinus y especies acompañantes.</i>	93
<i>Cuadro 21. Fósforo acumulado en tejido foliar del género Lupinus.</i>	95
<i>Cuadro 22. Sitios reportados en la literatura con presencia de Lupinus.</i>	96
<i>Cuadro 23. Área de las zonas de muestreo designadas por buffer.</i>	98
<i>Cuadro 24. Orden de los grupos asignados a los sitios de mayor a menor altitud.</i>	98
<i>Cuadro 25. Propiedades físicas de los suelos por grupo.</i>	104
<i>Cuadro 26. Propiedades químicas de los suelos por grupo.</i>	107
<i>Cuadro 27. Condiciones del suelo donde se establece Lupinus y suelos homólogos donde no se estableció.</i>	111
<i>Cuadro 28. Condiciones del suelo donde se establece Lupinus según profundidad.</i>	112
<i>Cuadro 29. Relaciones entre Carbono: Nitrógeno y Nitrógeno: Fósforo.</i>	113
<i>Cuadro 30. Resumen del ANOVA para los suelos donde se establece el género Lupinus en los suelos tipo.</i>	122
<i>Cuadro 31. Resumen de los ANOVA de los suelos reportados en la literatura.</i>	122
<i>Cuadro 32. Resumen de los análisis GLM para las diferentes variables de planta.</i>	123

Índice de abreviaturas

ANP	Área Natural Protegida
AQ	Alcaloides quinolizidínicos
C	Carbono
C.E	Conductividad eléctrica
Ca	Calcio
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
cmol kg⁻¹	Centimoles por kilogramo
COS	Carbono orgánico en el suelo
D.A.	Densidad aparente
D.R.	Densidad relativa
ENN	Estado nutricional del nitrógeno
FBN	Fijación biológica del nitrógeno
G	Grupos asignados
K	Potasio
L. spp	Especies del género <i>Lupinus</i>
LENV-8	Laboratorio-8, de edafología y nutrición vegetal. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
MOS	Materia orgánica del suelo
Mg	Magnesio
MOS	Materia orgánica del suelo
N	Nitrógeno
n =	Repeticiones
Na	Sodio
Nt	Nitrógeno total
P	Fósforo
PNI-P	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl
NH₃	Amoniac
NH₄⁺	Amonio
NO₃⁻	Nitratos
H₂PO₄⁻	Fosfato de dihidrógeno
HPO₄²⁻	Fosfato de hidrógeno
Ind.	Individuo



Resumen

Esta investigación se realizó en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su zona de influencia en un gradiente altitudinal entre 2700 y 4000 m snm en suelos bajo especímenes que forman colonias del género *Lupinus*. El objetivo de este trabajo fue describir, en cuatro especies del género *Lupinus*, el estado nutricional de nitrógeno (ENN) representado por el porcentaje o el contenido de este nutrimento por unidad de biomasa y la relación de este ENN con el nitrógeno total del suelo y con algunas propiedades edáficas donde se desarrolla *Lupinus* en este Parque Nacional y su zona influencia.

Se realizaron recorridos en los que se seleccionaron seis sitios con poblaciones de *Lupinus montanus* encontradas en el intervalo de altitud que va de 3520 a 4000 m snm; *Lupinus aschenbornii* entre 3309 a 3637 m snm; *Lupinus bilineatus* de 3000 a 3642 m snm y *Lupinus elegans* de 2700 a 2980 m snm. Los sitios de estudio elegidos, por presentar colonias de *Lupinus* se ubicaron, georreferenciaron y caracterizaron ecológicamente, además de que se colectaron y herborizaron especímenes de referencia y plantas completas tanto de *Lupinus* como de las especies acompañantes en las que se realizaron los análisis químicos de tejido vegetal. Además de lo anterior, para los análisis químicos y físicos de los suelos, se tomaron muestras circundantes en donde se estableció *Lupinus* y de sitios adyacentes donde ya no se encontró a *Lupinus*.

Para colectar el tejido vegetal, se separaron sus órganos y fueron pesados en fresco (flor, hojas, tallo, raíz, vaina). Posteriormente fueron secados hasta peso constante, para después molerlos y tamizarlos con malla No. 20. Las variables evaluadas para el tejido foliar fueron peso seco, nitrógeno-total y fósforo-total en inflorescencias.

Simultáneamente al trabajo de campo se realizó una búsqueda bibliográfica y cartográfica de trabajos realizados en tesis y artículos sobre propiedades edáficas en sitios del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl donde se ha reportado la presencia de *Lupinus*. Con la ayuda de Google Earth Pro 7.3.3.7786 y de Qgis 3.18.1-Zürich Pro., se localizaron y discriminaron los sitios reportados considerando factores inclusivos como: altitud, tipo de suelo dominante, posición con respecto al Parque, clima, vegetación dominante y uso de suelo. De bases de datos de 15 autores, se hizo un filtrado de información de 74 sitios con los que se formaron 5 Grupos “G” correspondientes a pisos altitudinales. Cada grupo “G” formado se caracteriza por tener al menos un sitio visitado y debidamente caracterizado.

En el primer grupo **G1** en zonas mayormente conservadas donde se ubicaron los sitios “La Ranita” y “La Joya” (3800 - 4000 m s.n.m.) se encontró a *Lupinus montanus*; los sitios del **G2** se representan por lugares como “Paso de Cortés” (3520 - 3762 m s.n.m.) con *Lupinus montanus* en zonas impactadas por turismo recreativo; en sitios del grupo **G3** donde predomina *Lupinus aschenbornii* se representan por sitios como “Cascada Buenavista” sobre el decline este de la



sierra (3309-3637 m s.n.m.); en los sitios pertenecientes al **G4** representados por el sitio denominado “Potrero” se avistó a *Lupinus bilineatus* (3000-3642 m s.n.m.) en el decline occidental de la sierra, sitio que presenta los mayores impactos por actividad agrícola; finalmente en los sitios pertenecientes al **G5** representados por el lugar llamado “Xalitzintla” presenta a *Lupinus elegans* (2700 - 2980 m) en la zona más alejada del parque y mayor impacto agrícola. Como resultado del análisis de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que utiliza la herramienta “Buffer simple” de tres aristas (disueltas si el próximo perímetro toca), se delimitaron áreas de 250 m², lo que representó una superficie de 652.1 ha (276.1 ha de ellas en la zona de mayor conservación y 376 ha de la zona de influencia en la que hay mayor actividad antropogénica.

El análisis de resultados en la base de datos por grupo, mostró que todas las colonias de *Lupinus* se desarrollan bien en suelos moderadamente ácidos (pH = 5.6), conductividades eléctricas (C.E) promedio de 0.1 dS m⁻¹ consideradas bajas, suelos arenosos (> 70% de arena), densidades aparentes ≤ 1 g cm⁻³ (promedio de 0.9 g cm⁻³) excepto en G5, de todos el más impactado y de menor conservación (1.1 g cm⁻³), espacio poroso (EP > 60%) excepto en el G2 donde el EP oscila en 43% y que al ser comparados con otros suelos de origen volcánico, fueron pobres en materia orgánica (4.5% +), también en nitrógeno (0.1-0.3%) y respecto a fósforo disponible también muy pobres (0.1 a 0.2 mg k⁻¹).

Los contenidos de N en tejido vegetal en G1 van de 5.7 - 5.9 % y corresponden a *L. montanus*, en G2, su promedio es de 8.5 % en *L. montanus*, los del G3, están en 9.3 % y son de *L. aschenbornii*, el G4 con 9.3 % en promedio corresponde a *L. bilineatus* y el G5 con 8.4 %, corresponde a *L. elegans*.

Las plantas de otros géneros asociadas a los diferentes ambientes donde se estableció *Lupinus* fueron *Penstemon*, *Festuca*, *Botriochloa*, *Erygium*, *Salvia* y *Conyza*. Respecto a la ENN, las cuatro especies de *Lupinus* tuvieron mayor habilidad para acumular materia seca y nitrógeno en sus tejidos vegetales, especialmente en las flores, en comparación con las especies asociadas a ellas en su hábitat edáfico.



Introducción

La nutrición vegetal es una disciplina de la fisiología vegetal y de las ciencias del suelo, ocupada de estudiar los procesos involucrados en la absorción y asimilación de los nutrientes por las plantas superiores, así como de los factores que la afectan y su relación con la calidad de las cosechas. Así, los estudios de esta disciplina dan una respuesta a interrogantes, como; ¿Cuáles son los nutrimentos limitantes en el diagnóstico de las plantas cultivadas?, ¿en qué cantidad se requieren estos nutrimentos?, ¿en qué forma química son absorbidos?, ¿en qué estado fenológico se absorben preferentemente?, ¿cómo se absorben y transportan? y ¿cómo afecta la producción y la calidad de los cultivos? (Alcántar & Trejo-Téllez, 2009).

Las evaluaciones nutricionales mediante la comparación y el análisis suelo-planta en concentraciones críticas o de referencia permiten inferir la probabilidad de que ocurran limitantes para la producción a causa de déficit o exceso de nutrientes en las plantas cultivadas, que es donde se han hecho adelantos científico-técnicos. También en estas se ha detectado que el momento oportuno para la colecta de muestras vegetales y realizar el diagnóstico es el inicio de la floración (o al llegar al 10% de ella) colectando la parte más apropiada para evaluar el estatus de la mayoría de los nutrientes (Barbazán *et al.*, 2007). El estudio nutricional de especies vegetales silvestres con alto interés por su importancia ecológica no ha sido abordado a profundidad. *Lupinus* spp. es una especie silvestre de la familia Fabaceae, cuya importancia ecológica radica en su capacidad fijadora de nitrógeno y sus aportes de este nutrimento al suelo incrementando su fertilidad natural y recientemente utilizada como abono verde (Zamora-Natera *et al.*, 2019).

Ya desde 1985, Etchevers y colaboradores señalaron que el levantamiento nutricional es un inventario nutricional de una especie dada en una región dada y desde entonces varios trabajos se han realizado con esta temática (Maldonado *et al.*, 2001; Norori, 2014; Cardona, 2017).

Por lo tanto, existen abundantes referencias en la literatura que citan el estado o levantamiento nutricional de cultivos, como: el análisis de *Lotus corniculatus* (Barbazán *et al.*, 2007), de cultivos como el maíz, soja, trigo y girasol (García & González, 2013) o literatura que se dedica al estudio de cultivo que son el sustento de la población (Maldonado *et al.*, 2001; Norori, 2014), como es el maíz, y sus variedades (García, 1994; Hernández, 2000 y Mancilla 2018). Además de que existen las normas DRIS (Diagnostic, Recommendation Integrated System), que dan un diagnóstico nutricional basado en la calibración de las normas (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009; García, 2000). Aunque son escasos, existen trabajos de nutrición vegetal en especies forestales como *Abies religiosa* y *Pinus* en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNI-P) (Domínguez, 2001).



Con todo, se carece de información y estudios que hablen de estado nutricional de especies silvestres. Por ejemplo, Marschner (1995), menciona que la concentración de nitrógeno en tejido vegetal esta normalmente en el intervalo de 0.5 a 5% de peso total de la materia seca, dependiendo de la especie de planta, tipo de tejido y disponibilidad, sin embargo, en tejido foliar de las especies del género *Lupinus* aún no se tienen reconocidos los intervalos (Zamora *et al.*; 2019) de suficiencia de este elemento ni la relación entre nitrógeno total de los suelos y sus contenidos en su tejido vegetal.

Las especies silvestres del género *Lupinus* crecen en el PNI-P y su zona de influencia, de manera abundante en el ecosistema forestal, tanto en el sotobosque como en el clarobosque, donde forman grandes poblaciones por arriba de los 2500 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.) hasta por encima de los 4000 m s.n.m. desarrollándose con éxito en suelos ácidos (Bermúdez-Torres *et al.*, 2015).

A algunas plantas de este género se les ha dado usos agrícolas, ganadero y como cultivo de rotación, ya que ayuda a fijar el nitrógeno al suelo y solubilizar potasio para recuperar suelos degradados (Cantor, 2017). A nivel mundial son cultivadas cuatro especies de *Lupinus* (*L. albus*, *L. angustifolius*, *L. luteus* y *L. mutabilis*), las cuales han sido seleccionadas para su uso en la alimentación animal y humana (Clements *et al.*, 2005) por ello, se requieren de estudios que establezcan el valor nutricional de este género tanto en especies silvestres como cultivadas.

Los atributos de *Lupinus*, como la asociación con bacterias del género *Bradyrhizobium*, le permiten fijar nitrógeno atmosférico lo que las hace una especie de interés por su crecimiento y desarrollo favorables en suelos como los de la alta montaña de la región de los volcanes Iztaccíhuatl Popocatepetl, que, si bien son ricos en materia orgánica, también se sabe presentan tasas de mineralización lenta.

Respecto al nitrógeno es importante señalar que la cantidad de éste en el suelo es generalmente baja, mientras que la extraída anualmente y consumida por las plantas es comparativamente alta. También se sabe que las formas químicas asimilables del N del suelo son demasiado solubles y van por drenaje. En suelos inundados, como los del PNI-P, la mineralización es demasiado lenta lo que puede convertir al N como un elemento inasimilable por las plantas superiores, por lo que este es un importante nutrimento que no sólo ha de ser conservado, sino regulado (Cruz-Flores *et al.*, 2009).

En los suelos ácidos, la mineralización de la materia orgánica libera al N en forma de amoníaco, sin embargo, el nitrato es la forma del N que ha demostrado dar un mejor desarrollo a las plantas



superiores en suelos ácidos (Cruz, 2006). Este escenario hace que las plantas fijadoras de nitrógeno, como *Lupinus*, brinden el servicio ecosistémico de aportar nitrógeno al suelo e incrementar sus reservas en el suelo. Una deficiencia de nitrógeno en las plantas provoca amarillamiento de las hojas y reducido crecimiento (Cruz-Flores, 2006; Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).

Antecedentes

Según González-Sama *et al.*, (2006), *Lupinus* tiene muchos atributos que, además de su potencial para la alimentación humana y animal por el elevado nivel proteico de sus semillas (30-50 %), es muy importante en la recuperación de la fertilidad de los suelos porque se adapta a suelos con escasez de agua, acidez alta y de baja fertilidad ya que pueden solubilizar y absorber fósforo y otros elementos del suelo, esto sucede gracias a su sistema muy extensivo de raíces proteoides y capacidad de fijación de nitrógeno que realiza mediante simbiosis con bacterias del género *Bradyrhizobium*, un rizobio de crecimiento lento pero que a cambio establece una de las simbiosis más efectivas fijando entre 102 y 252 kg de N ha⁻¹año⁻¹.

Además, *Lupinus* también posee un poder de aclimatación a diversas condiciones como suelos extremadamente pobres, sequías, heladas, altas concentraciones de aluminio, etc., es por eso que se le atribuye un gran potencial para ser usada en la agricultura basada en la reducción del uso de pesticidas y fertilizantes (Balan, 2009).

Existe una simbiosis entre microorganismos y plantas leguminosas que en el tiempo establecen una infección y formación de nódulos, este proceso comienza con el exudado de metabolitos como flavonoides y lecitina que promueven la colonización microbiana y con ello, en el género *Lupinus* se ha reconocido a *Bradyrhizobium lupini*, siendo este un organismo responsable de la fijación del nitrógeno en los tejidos (Figura 1) (Cruz-Flores, 2006).

<p>Sistemas de fijación de N₂</p> <p style="text-align: center;">N₂ → NH₃</p> <p>Microorganismos que están involucrados</p>	 <p style="text-align: center;"><u>SIMBIOSIS</u></p> <p>Hospedero: <i>Lupinus</i> Huésped: <i>Rhizobium</i> Actinomicetes</p>
<p>Fuentes de energía de C orgánico</p>	<p>Sacarosa y sus metabolitos (Aportados por la planta hospedera)</p>
<p>Estimación de N₂ fijado</p> <p style="text-align: center;">kg N ha⁻¹ año⁻¹</p>	<p style="text-align: center;">Leguminosas noduladas</p> <p style="text-align: center;">50-400</p>

Figura 1. Tipos, fuente de energía y capacidad biológica de fijación de N₂ en suelos bajo leguminosas noduladas, como las del género *Lupinus*. Modificado de Cruz-Flores, 2006.



A esta fijación del nitrógeno en los tejidos vegetales por la acción de microorganismos se le conoce como Fijación Biológica del Nitrógeno (FBN) que, en leguminosas nativas de México está poco estudiado y, particularmente dentro del género *Lupinus*. Zamora *et al.*, (2019) reportan la cantidad de N fijado por hectárea por *Lupinus* establecidas en Jalisco, México (*Lupinus exaltatus*, *Lupinus rotundiflorus* y *Lupinus mexicanus*), las cuales brindaron entre 86 y 187 kg de N ha⁻¹.

En otros países de América Latina se han realizado estudios sobre el *Lupinus* como abono verde y la cantidad de nitrógeno aportado al suelo, por ejemplo, Barrera en el 2015 realizó estudios en Colombia con *Lupinus mutabilis*, donde se reporta que la cantidad de N aportado fue de entre 288.4 y 501.12 kg ha⁻¹, por lo que concluyó que *Lupinus* fue un abono verde eficiente. En Chile, *Lupinus albus* y *Lupinus angustifolius* son usadas como alternativa en la rotación de los cultivos como alternativa para recuperar los almacenes de nitrógeno en el suelo por lo que se concluyó que ambas especies fijan y aportan entre 197 y 282 kg de N ha⁻¹ (Barrientos *et al.*, 2002). Sin embargo, se carece de información sobre la acumulación de N en las especies que crecen en México, así como las propiedades que del suelo en las que se desarrollan.



Marco teórico

Descripción del suelo

El suelo es un componente esencial de todos los ecosistemas, su nombre proviene del latín *solum* que significa piso y constituye un recurso único, irremplazable y esencial para todos los organismos terrestres, además de ser el producto final de la influencia del tiempo en combinación con la influencia de plantas, agua, aire y organismos que interactúan en él (Navarro y Narro, 2013; FAO, 2019). Por ello, se ha definido como un medio natural del que las plantas superiores extraen agua y nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo (Cruz-Flores, 2006) compuesto por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases (USDA, 2022).

La formación de los suelos resulta de la acción combinada de diversos factores (origen y tipo de roca, clima, organismos, geomorfología y **tiempo**). Desde luego no es un medio inerte, ni estático, ya que permite intercambios entre la litósfera, la biósfera y la atmósfera e hidrósfera (Porta *et al.*, 2015; Moravec & Chorover, 2020); además de la recientemente incluida la antropósfera debido a que la acción de ésta puede provocar degradación o recuperación de los suelos (Cruz-Flores & López-López, 2015).

Para distinguir al suelo hay tres características principales que mencionó la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) en el 2015: 1) está formado por materiales minerales y orgánicos e incluye fases sólida, líquida y gaseosa, 2) los constituyentes están organizados en estructuras específicas para el medio edafológico y 3) son el resultado de la historia de la cobertura y de sus dinámicas y propiedades actuales, esto permite comprender el pasado y el presente para poder predecir su futuro. Con ello podríamos decir que el suelo está en constante evolución dando así su cuarta dimensión, el tiempo.

Estas características combinadas con factores físicos, químicos y agregados de materia orgánica actúan sobre la roca madre y forman el suelo, a esto se le llama pedogénesis, en conjunto con un tejido poroso que agrega aire y minerales en partículas de diferentes tamaños: arcillas, limos, arenas, gravas, rocas, junto con el agregado de la materia orgánica (White, 2006); porciones representadas en la Figura 2.

Por otra parte, según Doran & Parkin en 1994 dijeron que la capacidad edáfica se forma a una tasa de 1 cm por cada 100 a 400 años y, más recientemente Porta *et al.* en el 2003 mencionan que en climas templados y fríos y sobre ceniza volcánica pueden tardar hasta 5000 años, lo que hace al suelo un recurso frágil.

Dentro de las partículas que forman el suelo se encuentran los fragmentos de roca y minerales que varían enormemente en tamaño, forma y composición. Las partículas más pequeñas pueden ser de < 0.2 mm



de diámetro (arcillas) y hasta menores de 1 μm que, al mezclarse rápidamente con agua forman sustancias coloidales (White, 2006).

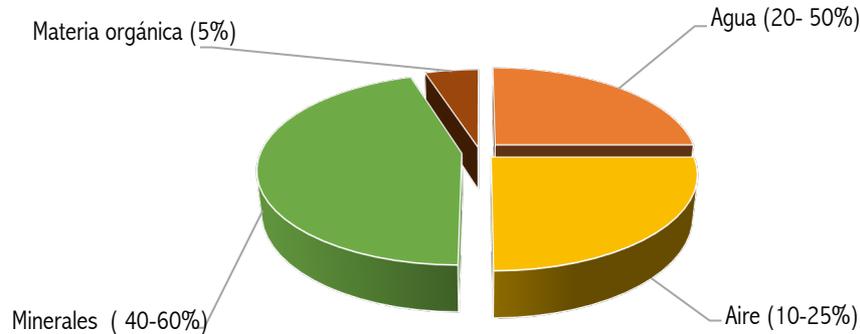


Figura 2. Gráfico de pastel donde se muestra la porción de compuestos más importantes del suelo. Tomado y modificado de White, 2006.

En la clasificación por tamaño de las partículas se contemplan, además, de las arcillas y las partículas coloidales, otro tipo de partículas clasificadas por su tamaño como limos (0.002mm a 0.05 mm) y arenas (0,05 mm a 2,0 mm) que, en conjunto comprenden el 100% de la composición mineral (Doran *et al.*, 1996) dependiendo del estimado de estos componentes se le asigna una clase textural que está plasmado en la figura 3.

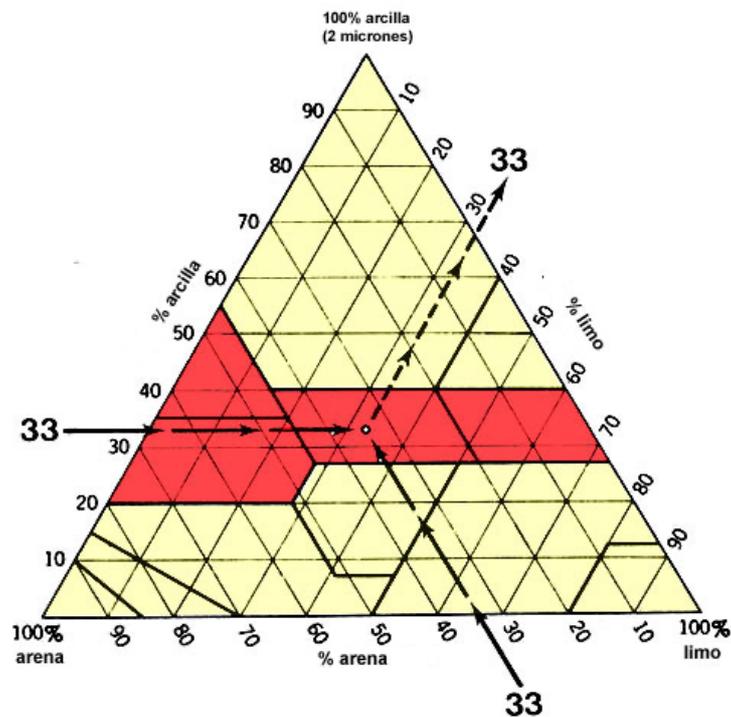


Figura 3. Triángulo textural. Obtenido de fao.org

La porción de partículas en el proceso de formación del suelo se ve influenciada por las condiciones que la región presente, por ejemplo, la precipitación y temperatura que forman procesos de lixiviación y meteorización que participan conjuntamente en el proceso de génesis del suelo (Cruz, 1994; White 2006). Existen procesos de carácter físico como la erosión y la sedimentación que pueden condicionar la acción del climática y la vegetación de la región, además, el uso actual que los humanos le dan al suelo y todo lo antes mencionado les proporcionan características únicas a los suelos de cada región (Jiang *et al.*, 2021).

Para estudiar los procesos de génesis y clasificar el suelo se necesita hacer un perfil y describir sus horizontes (Figura 4) que son capas aproximadamente paralelas a la superficie con características proporcionadas por los procesos de formación de suelo ya mencionados (Soil Survey Staff, 1992). La magnitud de cualquiera de las propiedades está determinada por la acción de estos factores formadores (Figuroa *et al.*, 2018).

$$\text{Sistema suelo} = S = f(\text{clima, roca madre, organismos, relieve, tiempo})$$

(Ramírez, 1997; Cruz-Flores, 2006; Porta *et al.*, 2011).

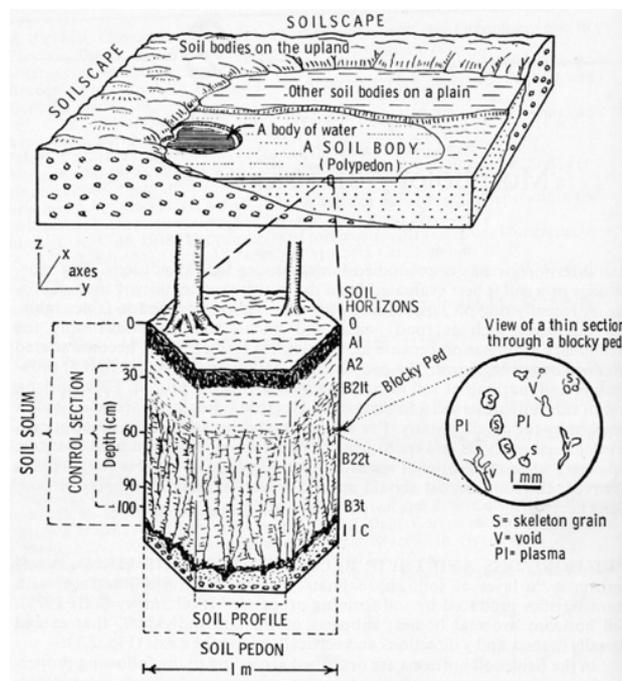


Figura 4. Perfil del suelo, pedión, polipedón y pedopaisaje. Boul *et al.*, 1997.

Para conocer el suelo y los procesos que ocurren en él se debe considerar que la unidad mínima del sitio refleje las condiciones del edafopaisaje haciendo así referencia a los cambios edáficos, la unidad mínima se denomina pedón (NRCS, 2006) y sus características se repiten a lo largo de cierta distancia hasta que



el intervalo de variaciones forma un pedón distinto (Porta, 2011). En muchos casos, para comprender el comportamiento del suelo de un edafopaisaje en específico y dar las interpretaciones correctas, resulta útil aumentar o disminuir la escala de estudio y llegar de esta manera a un análisis más detallado.

En campo los horizontes se describen de acuerdo a propiedades como: color, textura, consistencia, estructura, cutanes, nódulos, espacio poroso, pH y límites o continuidades de los horizontes. Una vez descritas las características morfológicas de los horizontes, es conveniente determinar y dar nombre para fines de clasificación (Buol, *et al.*, 1997). Para dar nombre a los horizontes, estos se han agrupado en grupos de horizontes principales: O, A, B y C que se subdividen debido a diferentes características que son producto de la evolución del suelo y poseen características físicas, químicas y biológicas propias (Valencia & Hernández, 2002).

El primer horizonte conocido como horizonte tiene contacto con la biósfera, también conocido como horizonte O y está caracterizado por su alto contenido alto en materia orgánica es el superior y que tiene el principal contacto con otras biosferas, después se encuentra el horizonte A (eluvial) en la superficie y es una zona que se caracteriza por altos niveles de aireación y lavado (Cruz-Flores, 2006), después se encuentra el horizonte B (iluvial), incluye las capas en las cuales tiene lugar la sedimentación proveniente de las capas superiores y a veces las inferiores; es la región de máxima acumulación de materiales de óxidos de hierro, aluminio y arcillas (Aguilera 1989; Cruz-Flores, 2006). Por último, se encuentra el horizonte C, igualmente conocido como material parental, es una capa donde puede observarse menor grado de meteorización y comúnmente tiene materiales de los horizontes A y B (Aguilera 1989). Estos horizontes son descritos en el Cuadro 1.

Dentro del perfil del suelo actúan los procesos iniciales como hidrólisis, hidratación, disolución, oxidación, reducción, humificación, así como la transformación de nutrientes y otros procesos secundarios como el intercambio iónico, translocación, dispersión, agregación y precipitación. Estos procesos actúan sobre los factores formadores a lo largo del tiempo geológico para que los perfiles se desarrollen gradualmente y presenten una madurez (Cruz-Flores, 2006).

Finalmente, el suelo es el producto de la influencia del **tiempo**, combinado con la topografía, el clima, organismos que habitan en él, así como los materiales parentales que conforman a este componente esencial para los ecosistemas (FAO, 2019) por ello, un cuerpo dinámico y juega un papel muy importante (Doran & Parkin, 1994; Ochoa *et al.*, 2007) por ser el sostén de la vida, razón por la cual debe conocerse de que está formado, su manejo integral y sus interacciones con otras biosferas, además de darle la importancia como sostén de lo que conocemos como vida (Bautista, *et al.*, 2004).



Cuadro 1. Características de los principales horizontes del suelo tipo (Tomado y modificado de Buol *et al.*, 1997 y Cruz-Flores, 2006).

HORIZONTE	CARACTERÍSTICAS
HORIZONTES ORGÁNICOS EN SUPERFICIES DE SUELOS MINERALES	
0	Se forman del mantillo orgánico derivado de plantas y animales depositados en la superficie mineral. Se miden hacia arriba a partir del tope mineral subyacente (de 15-0 cm)
01	Horizontes orgánicos (>20 a 30 % de M. O.) en los cuales se nota el material original del que está formado la mayor parte de los depósitos de origen vegetal, la cual no está alterada esencialmente.
02	En este horizonte el material vegetal o animal puede reconocerse a simple vista. Pueden identificarse restos de animales y vegetales y su porcentaje de M. O. debe ser menor a 20. (En suelos cultivados se llama Ap)
Horizontes minerales y capas	
A	Están constituidos por la acumulación de materia orgánica (MO) proveniente de la superficie, han perdido arcilla, hierro o aluminio, y materiales de tamaños de limos y arenas.
A1	Horizonte mineral superior. El aspecto destacado en este perfil es la acumulación de MO humificada, íntimamente asociada a la parte mineral. Generalmente son de color oscuro.
A2	Se diferencian por la pérdida de arcilla, hierro o aluminio, con la concentración resultante de materiales de tamaño de arenas o limos. Se diferencia del anterior por el color más claro y menor cantidad de MO.
B	Pueden tener una o más de las siguientes características: 1) concentración de arcillas silicatadas, 2) concentración de sesquióxidos, 3) recubrimientos de sesquióxidos visiblemente más oscuros, fuertes o más rojos. 4) Alteraciones de materiales a partir de su condición original.
B1	Horizonte de transición entre B y A1 o entre B y A2, que está dominado por B. (solo se presenta en regiones con alta precipitación)
B2	Aquella parte del horizonte B en donde las características son específicas de esa sección y hay materiales exclusivos de la sección.
C	Es un horizonte o capa mineral que excluye la roca madre, la cual puede ser del mismo material del que se presume que es la roca madre.
R	Es la roca madre consolidada y subyacente, como granito, arenas o caliza y generalmente la capa subyacente está formada de materiales provenientes de ésta.



Fertilidad del suelo

La calidad del suelo se basa en las cualidades inherentes y dinámicas de este y los procesos que en ella se dan, así como su interacción. Para determinar la fertilidad de este cuerpo se describen múltiples indicadores físicos, químicos y biológicos que responden a los cambios en el sistema (Ochoa *et al.*, 2007) para conocer si un suelo es fértil y con ello asegurar que la vida se desarrolle en él (Figura 5).

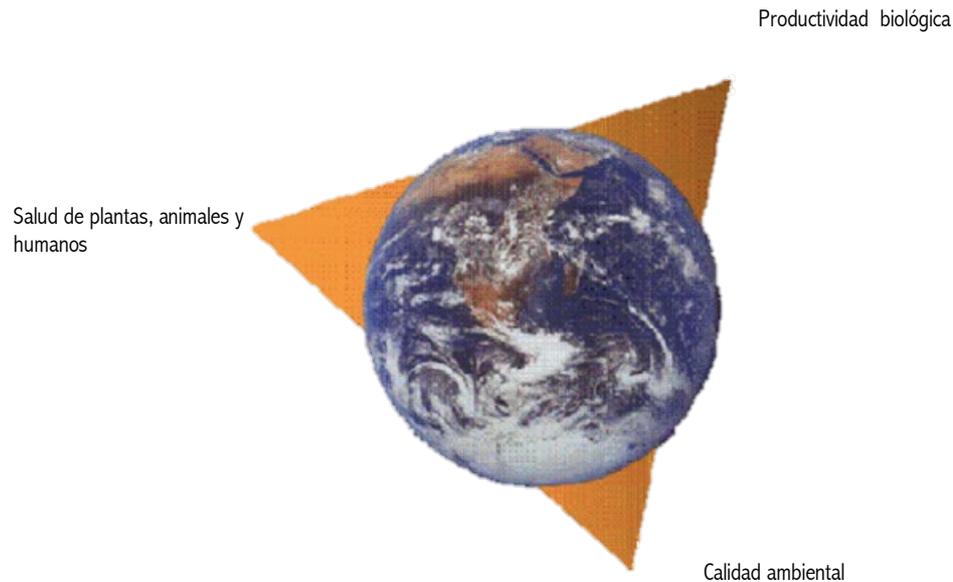


Figura 5. Principales indicadores de la calidad del suelo.
Modificado de Ochoa *et al.*, 2007.

Un suelo fértil se denomina como aquel con características óptimas para el desarrollo de las raíces de las plantas para permitirle nutrirse con los minerales durante el desarrollo y crecimiento vegetal, es por esto que conocer la calidad del suelo serviría para conocer la utilidad, estado y salud del mismo (Ochoa *et al.*, 2007). Otro concepto define a un suelo fértil como aquel que tiene la capacidad para sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental promoviendo la salud de la flora y fauna, la productividad biológica sostenible, la calidad ambiental, la salud del hombre y la variabilidad natural del suelo de modo que pueda funcionar dentro de los límites de un sistema natural o manejado y mantener o mejorar la calidad del agua y aire (Doran & Parkin, 1994; Rubiano, *et al.*, 2005; García, *et al.*, 2012). No obstante, mantener la fertilidad se ha dificultado debido a que el suelo es una entidad con una multitud de procesos biológicos y geoquímicos de alta heterogeneidad (Ochoa, *et al.*, 2007). Por ello, el desarrollo de indicadores de la calidad del suelo debe basarse en los propósitos de acuerdo a su uso y la relación entre los indicadores, así como la función que se está evaluando (Carter *et al.*, 1999).

Para la producción de alimentos, el concepto de calidad del suelo se basaba en maximizar la producción y minimizar el riesgo de erosión (Doran & Parkin, 1994; SQI, 2001) en la actualidad se han inclinado más hacia la sostenibilidad y el uso técnicas de labranza que conserven las propiedades del suelo, ya que su pérdida no es recuperable en un marco de tiempo de vida humana (FAO, 2022).

Es por ello que para contribuir a mantener el estado del suelo y considerar indicadores de esto se deben cumplir algunas condiciones como describir los procesos de los ecosistemas, integrar las condiciones para que se dé la fertilidad física, química y biológica (Figura 6), aunado a que los indicadores deben ser sensibles a variaciones del manejo y degradación antropogénica (Doran & Parkin, 1994, García, *et al.*, 2012).

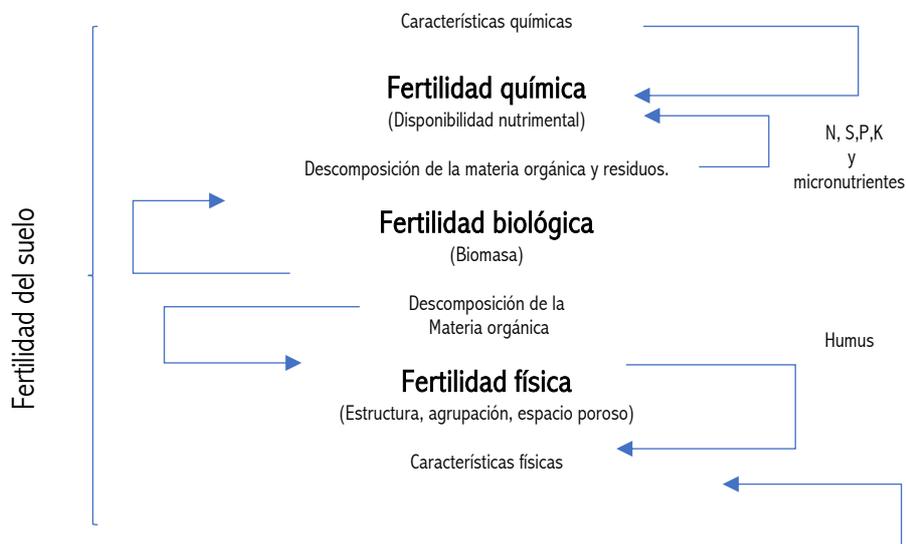


Figura 6. Relaciones y factores que influyen en la fertilidad del suelo. Modificado de Etchevers, 2000, tomado de Astier *et al.*, 2002.

Como se mencionó anteriormente, un suelo fértil se define como el que abastece a las plantas de nutrientes es por esto que se debe considerar integrar atributos físicos, químicos y biológicos y proveer un sostén para la vegetación (Astier *et al.*, 2002), sin embargo, el que existan múltiples interacciones entre la fase líquida, sólida y gaseosa en el ambiente edáfico determinan la disponibilidad de los nutrientes del suelo (Cruz-Flores, 2006).

Un atributo del suelo como indicador de la calidad puede ser una herramienta que mida y proporcione información sobre las propiedades, procesos y características que ocurren en él y con ello darle seguimiento para conocer su funcionamiento (Astier *et al.*, 2002).



Aún no existen criterios universales para evaluar la calidad del suelo y definir su fertilidad, es por ello se utilizan indicadores como atributos edáficos sensibles al manejo (García, *et al.*, 2012) siendo diferente para cada tipo de suelo (SQI, 2001) y según los objetivos que se persigan. El tipo y el número de indicadores depende de la escala de evaluación, ya sea regional, de campo, finca o cuenca así como las funciones de su interés (Astier *et al.*, 2002).

Los indicadores pueden evaluarse en un momento determinado o monitorearse a lo largo del tiempo para establecer tendencias (Doran, 1996; SQI, 2001), además de cumplir con tendencias como ser integradores, fáciles de medir y entender, ser aplicables en un ecosistema y sus condiciones, reflejar atributos de sostenibilidad, deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo e integrado por procesos físicos, químicos, biológicos (García *et al.*, 2012), productivos y sociales (Doran & Parkin, 1994) y de procesos interconectados con el paisaje (Rubiano *et al.*, 2005). De tal modo que la calidad del suelo pueda percibirse con incrementos o decrementos de los indicadores seleccionados, es por eso que existe la necesidad de desarrollar un enfoque que resalte la calidad del suelo reflejando mejores condiciones en la salud de los seres vivos (Astier *et al.*, 2002) para formar valores de referencia que sirvan de comparación y ayuden a gestionar problemas bajo diferentes sistemas de gestión (SQI, 2001).

Además de poder modelar y predecir el comportamiento de los indicadores del suelo y así dar una mejor interpretación, se ha integrado el sistema de información geográfica como una herramienta en la toma de decisiones (Rubiano *et al.*, 2005; Valderrábano, 2013), que a través del análisis espacial permite buscar patrones, evaluar tendencias y representar cartográficamente los sitios de interés.



Indicadores físicos

La FAO en el 2022¹ menciona que los tres aspectos fundamentales que designan un buen estado físico del suelo son: 1) el sellado y el encostramiento, 2) la ausencia de erosión física y eólica y, por último, 3) la ausencia de compactación. Por ello, se han propuesto como indicadores físicos de la calidad del suelo estructura, la densidad aparente, la estabilidad de los agregados, la infiltración, la profundidad del suelo superficial, la capa de almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica saturada (Cuadro 2) (García, *et al.*, 2012).

Cuadro 2. Indicadores físicos de la calidad del suelo (Modificado de García *et al.*, 2012).

INDICADOR	RELACIÓN CON LAS FUNCIONES Y CONDICIONES DEL SUELO
Textura del suelo	Retención y transporte de agua y minerales, erosión del suelo (%: arena, limo y arcilla)
Profundidad del suelo	Estimación del potencial productivo y de erosión
Capacidad de retención de agua	(%) Relacionado con el contenido de humedad, transporte y erosión
Estabilidad de agregados	Erosión potencial del suelo
Densidad aparente	(g cm ⁻³) Refleja el límite del crecimiento de las raíces, la emergencia de la plántula y la infiltración del agua (SQI, 2001)
Espacio poroso	Crecimiento radicular y dinámica del aire y agua (Rucks <i>et al.</i> , 2004)

Valdés *et al.*, (2009) proponen dentro de los indicadores físicos la estabilidad de los agregados para los sistemas ya que esto se refiere a la capacidad de los suelos para resistir la desintegración cuando se aplican fuerzas. El efecto de la fuerza se ve en la compactación del suelo, volviéndose un problema ya que evita la infiltración del agua inhibe los ciclos de los nutrientes (FAO, 2022¹)

Los agregados son grupos de partículas de suelo que se unen entre sí con más fuerza que las partículas adyacentes, como los minerales (USDA, 2008) y se puede definir como un grupo de dos o más partículas primarias (arena, limo y arcilla) que se unen a un mineral para formar una masa más compleja (Doran, *et al.*, 1996), la estabilidad de los agregados ayuda a conocer la capacidad de los suelos para absorber agua, resistir escorrentía y resistir la erosión (SQI, 2001), estas propiedades confieren características al suelo que le dan soporte a las plantas (Cruz-Flores, 2006) y, por ello, es importante considerarlos como indicadores de calidad del suelo.

Los agregados y la estabilidad de ellos se ven afectados por el tipo predominante de arcilla y su expansión, a medida que se humedecen pueden cambiar y agrietar la masa del suelo creando o rompiendo agregados de modo que el aluminio, hierro, magnesio y calcio estabilizan los agregados a través de puentes de puentes de arcilla (Figura 7) o por el contrario, el aumento de sodio aumenta la dispersión de las partículas de manera que la estabilidad de los agregados puede servir como indicadores tempranos de la erosión (USDA, 2008).

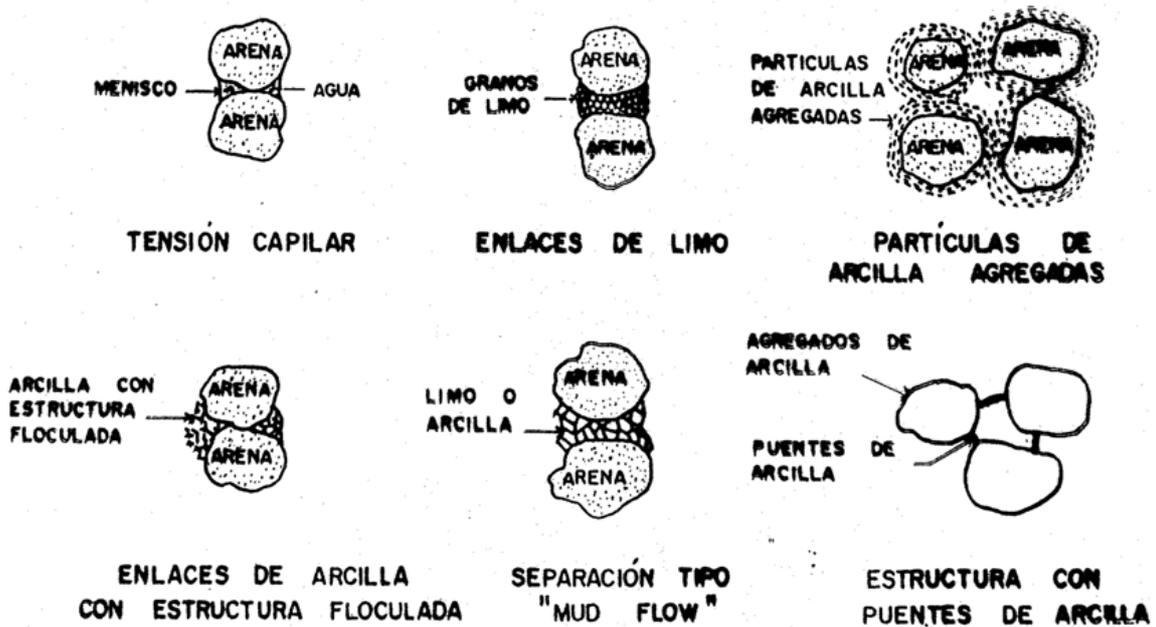


Figura 7. Enlaces temporales entre partículas cuya desaparición puede provocar el colapso. Tomado de <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/suelos-expansivos-colapsables/>

La textura del suelo también afecta la retención de nutrientes y agua, por ejemplo, en los suelos arcillosos se retiene mejor el agua y los nutrientes que en los arenosos, además, los procesos de lixiviación son mayores en los suelos arenosos comparado con los suelos arcillosos (Doran, *et al.*, 1996). De este modo, la textura del suelo está estrechamente ligada con la densidad aparente del suelo porque se refleja el comportamiento dinámico de la estructura y porosidad debido a que se puede ver inferir la compactación y aireación (Castillo, 2005).

Finalmente, los factores físicos no están separados de los demás influyendo en la estructura, la porosidad y la capacidad de retención del agua, lo que permite un crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas y por lo tanto de las partes aéreas (Astier *et al.*, 2002).



Indicadores químicos

Estos indicadores se refieren a las condiciones que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad y disponibilidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y los microorganismos que en ella se desarrollan (García *et al.*, 2012) de este modo, la degradación de los suelos puede notarse en aspectos químicos que incluyen el agotamiento de los nutrientes, la salinización de los suelos y el aumento de agentes contaminantes (FAO, 2022¹). De este modo, los indicadores dependen de la naturaleza del trabajo, los objetivos que se persiguen y las condiciones a las que se desea llegar por ello, en el Cuadro 3., se reflejan los principales indicadores químicos del suelo.

Cuadro 3. Indicadores químicos de la calidad del suelo (Modificado de García *et al.*, 2012).

INDICADOR	RELACIÓN CON LAS FUNCIONES Y CONDICIONES DEL SUELO
Materia orgánica	Fertilidad y productividad del suelo (SQI, 2001) y el grado de erosión.
Carbono orgánico	Como almacén de C en el suelo
pH	Actividad química y biológica, límite para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana
Delta pH	Saturación del suelo (Soriano, 2018)
Conductividad eléctrica	(dS m ⁻¹) Actividad microbiana de las plantas, límites para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana
N, P y K extraíble	Disponibilidad de nutrientes para las plantas y pérdida de potencial de N, indicadores de productividad y calidad ambiental

Por otra parte, las propiedades químicas juegan un proceso muy importante en la mineralización en la materia orgánica del suelo (MOS) además de que los microorganismos que habitan en ella son sensibles a cambios en el pH (Monsalve-Camacho *et al.*, 2017). La materia orgánica es aproximadamente entre el 0.5 y 5 % del suelo (Cruz-Flores, 2006) y es una fuente importante de sales minerales, sin embargo, necesita pasar por procesos de mineralización que controlan, en su mayoría, microorganismos (Cruz-Flores, 2006; Azcón-Bieto & Talón, 2008).

Doran *et al.* (1996), mencionan que hay estudios donde la eliminación de la profundidad del suelo reduce sustancialmente su fertilidad y, por otra, parte la adición de fertilizantes nitrogenados o fosfatados a la capa superior del suelo erosionado mejoran los rendimientos, de este modo la capa superficial del suelo es un indicador importante de la calidad y, por consiguiente, lo une a indicadores químicos.

Recientemente se realizaron estudios donde la enmienda orgánica afecta a los niveles de N disponible, en adiciones pequeñas de N orgánico y amonio (NH₄⁺), esto mejoraba el potencial de mineralización y, por el contrario, la adición de grandes cantidades lo disminuía (Monsalve-Camacho *et al.*, 2017). Otro indicador que puede afectar las propiedades físicas, químicas y biológicas y el crecimiento de las plantas es el pH (Cruz-Flores, 2006), por ejemplo, en un pH ácido el nitrógeno y fósforo son deficientes, mientras que el aluminio y el magnesio son abundantes y hasta tóxicos para algunas plantas (USDA, 2011). Es por esto que se llama al pH

como la **variable maestra** de todas las condiciones del suelo debido a que muchas otras condiciones dependen de él, por ejemplo, el grado de saturación de base y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos (Cruz-Flores, 2006).

El efecto del pH en el suelo nos indica la cantidad de cationes libres (H^+) no retenidos en el complejo de cambio dejando que tengan una gran actividad química, sin embargo, cuando una solución es puesta en contacto con una solución saturada en sales, como el KCl o el $CaCl_2$, el catión actúa desplazando los cationes retenidos en el complejo de cambio tal como se muestra en la figura 8 (Soriano, 2018).

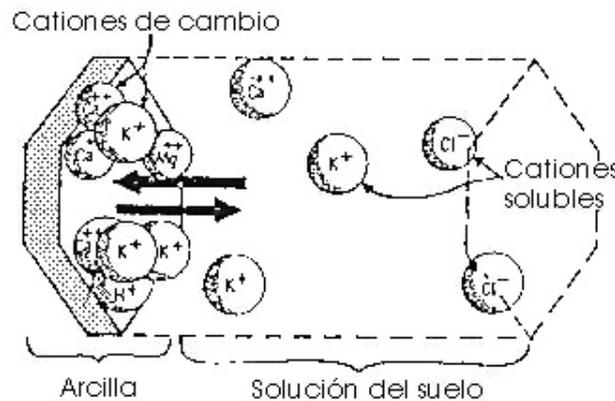


Figura 8. Las partículas de arcilla y moléculas orgánicas presentan una carga residual negativa sobre su superficie, por lo que son intercambiadores catiónicos <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/30/66696>.

De forma similar el pH puede ser medido con una sal que contenga un catión que sustituya los espacios intercambiables en el complejo de cambio (Figura 9) para describir la reserva de acidez del suelo, en el caso de los suelos ácidos se usa KCl y, en suelos carbonatados $CaCl_2$, el catión actúa en solución desplazando cationes retenidos por el complejo de cambio y entre los iones expulsados se encuentra el H^+ (Soriano, 2018).

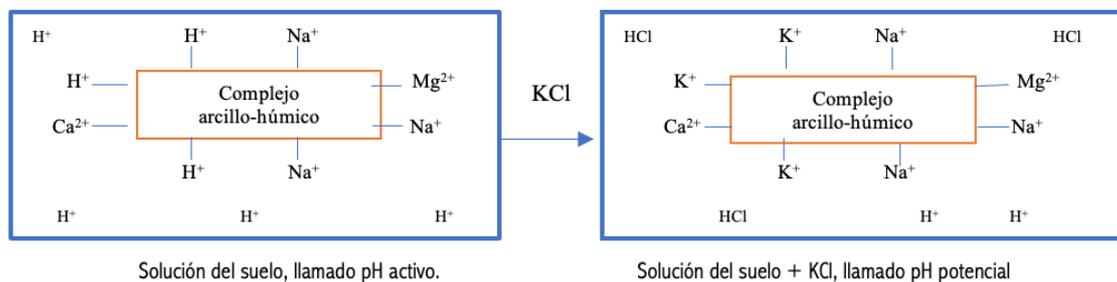


Figura 9. Representación del complejo de cambio en el suelo cuando es saturado con KCl donde se observa el intercambio del catión K^+ por el H^+ . Tomado y modificado de Soriano, 2018.

Esto manifiesta que el K^+ refleja la acidez intercambiable del suelo, por lo tanto, el pH medido en agua siempre será superior, así pues, la diferencia del pH medido en agua y el pH medido en la solución que contiene cationes como el K^+ y el Ca^+ muestra si está saturado (>1) o desaturado (<1) (Soriano 2018).

Por otra parte, el potencial de hidrógeno reconoce si un suelo es ácido o alcalino y esto es importante porque es de donde las raíces y los microorganismos toman los nutrientes además, en gran medida es un indicador de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, interviniendo en la movilidad y solubilidad de los elementos en el suelo (Figura 10) asociándose estrechamente con el rendimiento de los cultivos debido a que este influye el grado de adsorción de los iones de las partículas del suelo (FAO, 2022).

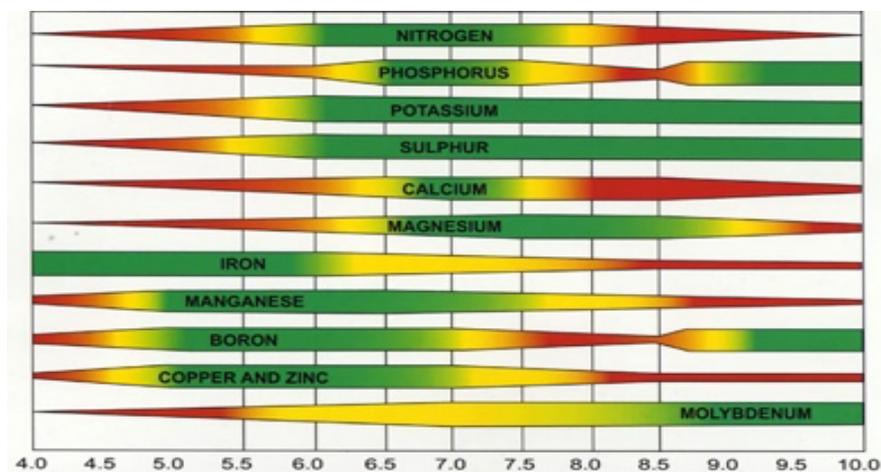


Figura 10. Tabla que muestra la solubilidad de nutrientes según el pH activo del suelo, siendo más solubles entre 6 y 7. Tomado de <https://aefa-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/clasificacion-del-pH/clasificacion-del-pH>

La acidez del suelo es una condición muy común en los suelos de las regiones húmedas tropicales, mientras que las alcalinas se encuentran en los suelos del trópico seco (Osorio, 2012), por lo que en suelos con pH ácidos la disponibilidad y asimilación es pobre comparada con los suelos neutros que tienen pH que ronda entre 6.5 y 7.5 donde la mayoría de los elementos se encuentra disponible (Figura 9).

Además, el pH interviene en la absorción de los nutrientes que se da a través de la raíz de las plantas donde se liberan soluciones que modifican las condiciones de la rizosfera que tiende a tener pH más bajo que el resto del suelo (Osorio, 2012) además los procesos de fijación biológica del nitrógeno (FBN) y la nitrificación también se inhiben en pH fuertemente ácido (USDA, 2011) por todas estas razones el **pH es un indicador maestro porque influye en muchas otras propiedades del suelo.**



Indicadores biológicos

Los indicadores biológicos integran una gran cantidad de factores que afectan la calidad del suelo, como la abundancia y los subproductos de los invertebrados (García *et al.*, 2012), los microorganismos que habitan y si se asocian a las plantas (Cruz-Flores, 2006) sin embargo, se considera el rendimiento de un cultivo o especie vegetal como indicador biológico debido a que las condiciones del suelo propician su desarrollo (Cuadro 4).

No obstante, la fertilidad biológica se estrecha altamente con la biomasa microbiana al ser este el descomponedor de la materia orgánica que proviene de los residuos animales y vegetales, siendo responsable del reciclaje del material y eso influye en las propiedades físicas y químicas del suelo (Astier *et al.*, 2002) por lo que no pueden verse de manera independiente ninguno de los atributos que influyen en la calidad del suelo.

Cuadro 4. Indicadores biológicos de la calidad del suelo (Modificado de García *et al.*, 2012).

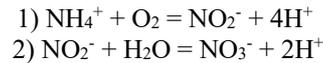
INDICADOR	RELACIÓN CON LAS FUNCIONES Y CONDICIONES DEL SUELO
Nitrógeno en forma orgánica	Productividad del suelo y aporte potencial del nitrógeno
Respiración edáfica, contenido de agua y temperatura del suelo	Se relaciona con la actividad microbiana
Diversidad genética	Tanto vegetales como animales e insectos
Rendimiento del cultivo	Producción potencial y disponibilidad de nutrientes

Las propiedades biológicas se relacionan con las propiedades físicas, como la agregación y con las químicas como el pH y la disponibilidad de nutrientes (Astier *et al.*, 2002) por ejemplo, el pH se influye en la actividad biológica del suelo. En algunos casos, se ha observado que en pH's menores a 6 existe una baja tasa de nitrificación (conversión de amonio NH_4^+ en ion nitrato NO_3^-) desapareciendo totalmente en pH's inferiores a 4.5, en cambio en suelos neutros a ligeramente básicos el número de organismos activos es superior (Soriano, 2018) y con ello la mineralización y disponibilidad de nutrientes.

Cabe recordar que el N proporcionado a las plantas por los microorganismos autótrofos que controlan los suministros de amonio (NH_4^+) y los microorganismos heterótrofos que controlan el suministro de nitrato (NO_3^-) lo realizan a través de dos etapas primero, transformando el nitrógeno orgánico en amonio (amonificación) y posteriormente sintetizándolo en nitrato (nitrificación) (Monsalve-Camacho., 2017).



Ecuación de la nitrificación: (Monsalve-Camacho., 2017)



En otro aspecto, Cruz-Flores (2006) menciona que el pH interfiere en las propiedades biológicas si se encuentra en valores ácidos haciendo que la nodulación de las leguminosas disminuya, además del cambio de coloración notable en los tallos pasando a tonalidades púrpura que puede observarse en cultivos tanto de gramíneas como de leguminosas, también pueden cambiar a colores amarillentos en los cereales siendo estas tonalidades síntoma de deficiencia de N.

Agregado a estas propiedades, según Astier *et al.* (2002), se lograría una mejor evaluación si se midiera como indicador de la calidad del suelo la diversidad biológica de los organismos vegetales, microorganismos, insectos y vertebrados así como el rendimiento de las plantas (granos o biomasa) y el vigor de las plantas esto, considerando que la acumulación de un elemento, por ejemplo el nitrógeno, que puede definirse como la cantidad del elemento, por unidad de biomasa vegetal (g N kg^{-1} de biomasa seca) (Delgado *et al.*, 2004; Cruz-Flores, 2006).

El nitrógeno es un elemento esencial ya que es necesario para la sintetizar aminoácidos y enzimas vegetales, dado que este elemento se ve naturalmente limitado en el suelo también afecta su disposición a las actividades humanas siendo satisfecha esta demanda a través del uso de fertilizantes nitrogenados y su mal uso ha dejado en rangos no sostenibles la relación C:N (Dolman, 2019).

Finalmente, el desarrollo de las plantas y las formas de vida que en él están depende de condiciones climáticas, (temperatura, humedad atmosférica, precipitación, exposición a la luz entre otros factores) además de condiciones edáficas (textura, materia orgánica, pH, salinidad y la disponibilidad de nutrientes) y condiciones fisiológicas como respiración y fotosíntesis participan como indicadores biológicos ya que determinan el crecimiento y desarrollo de la vegetación (Cruz-Flores, 2006).

Retomando la idea de que los indicadores no influyen de manera individual, para que exista una adecuada adquisición de nutrientes a través de la raíz debe existir una contribución relativa de cada uno de los mecanismos de adquisición de nutrientes que dependen del flujo de factores propios de la planta y el suelo como los mencionados por Cruz-Flores en el 2006:

FACTORES DE LA PLANTA
Área superficial de la raíz
Longitud de los pelos radicales
Densidad radical

FACTORES DEL SUELO
Humedad del suelo y temperatura
Textura y estructura
Densidad aparente



Mecanismos de absorción de nutrientes a través de la raíz

Los suelos se ven afectados por el cambio climático y a su vez pueden contribuir al aumento de éste. La gestión sostenible de los recursos del suelo contribuye eficazmente a mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero e influyen con los procesos de desertificación (FAO, 2022).

Los ciclos biogeoquímicos son procesos por los cuales un nutrimento es usado en diferentes formas en los ecosistemas y puede participar tanto en factores bióticos como abióticos lo que permite comprender de manera integral el funcionamiento de los ecosistemas y comprender la conexión que existen entre el suelo, la biósfera, atmósfera, hidrósfera y la biota (Esteve & Jaén, 2012), subsistema que juega un papel importante en la formación e interacción de todos los elementos, principalmente del C, N y P en el suelo, nutrimentos esenciales en la productividad de los ecosistemas, de bosque y pastizales, así como en el potencial del secuestro del C y que se pueden ver afectados por factores como el cambio de tipo de vegetación y las actividades antropogénicas (Jiang *et al.*, 2021).

La disponibilidad, velocidad y magnitud con la que se desarrolla un ciclo biogeoquímico también determina la calidad y cantidad de alimentos para los seres humanos pero la aplicación a gran escala de fertilizantes ha modificado el paso del ciclo provocando una aceleración y este evento se relaciona con el gran crecimiento demográfico posterior a la Segunda Guerra Mundial, esto, produjo grandes cambios en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno conduciendo a la contaminación y eutrofización de los mantos acuíferos, la excesiva deposición atmosférica y aumentando las emisiones de óxido nitroso de efecto invernadero (Dolman, 2019).

Sin embargo, para la biota y el suelo, los elementos en sus diferentes formas orgánicas e inorgánicas juegan un papel importante debido a que de ellos depende la nutrición y desarrollo de la vida. Cruz-Flores, 2006 menciona que para la mayoría de las plantas superiores el abastecimiento mineral del nitrógeno y del fósforo influyen drásticamente sobre la morfología y distribución del sistema radical en el suelo relacionándose estrechamente con lo mencionado por Jian *et al.*, 2021 donde las relaciones estequiométricas del C, N y P son usadas como un indicador clave en el rendimiento y reflejo de la calidad y composición del suelo.

Como consecuencia de la elongación de las raíces las plantas toman de manera natural los nutrientes del suelo a través de la raíz y de acuerdo a la cantidad en la que son absorbidos por las plantas se clasifican en macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) y

micronutrientes como hierro, cloro, boro, manganeso, cobre, molibdeno y zinc (Figura 11) (Cruz-Flores, 2006).

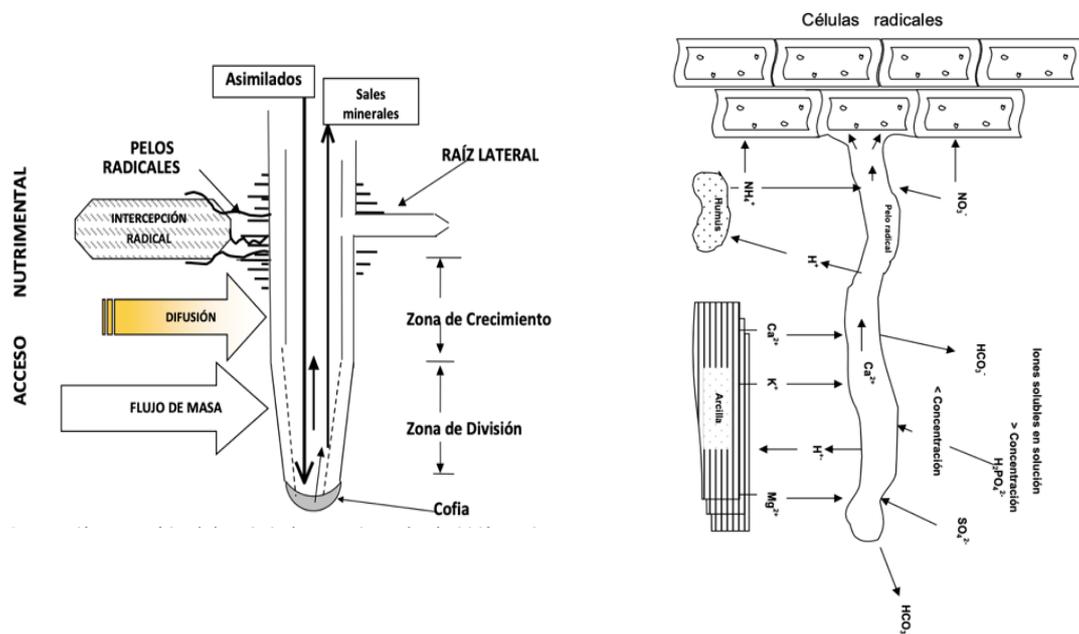


Figura 11. a) Presentación esquemática de los principales mecanismos de adquisición nutricional por las raíces de las plantas, b) Interacciones entre la solución y los absorbidos a coloides con las células radicales. Cruz-Flores, 2006.

El flujo de masa es un transporte conectivo de nutrientes disueltos en la solución del suelo hacia la superficie de la raíz que es proporcionado por la transpiración de la planta y funciona como bomba de vacío, generando una succión en el entorno de la raíz originando hacia ella un flujo de agua y sustancias minerales (Cruz-Flores, 2006). Esto le proporciona a la planta un mecanismo para el abastecimiento de minerales necesarios para su crecimiento.

Aquí el suelo juega un papel importante en el desarrollo de las plantas debido a que factores como el pH influyen directamente en la disponibilidad de cationes, la asimilación de nutrientes, el desarrollo de las plantas, el establecimiento de microorganismos simbióticos y la interacción con las arcillas (USDA, 2011). El establecimiento de pH entre 5.5 y 7 del suelo para la planta le proporciona condiciones buenas para el desarrollo morfológico, por el contrario, en las plantas que crecen en suelos ácidos la inhibición de la elongación de la raíz se relaciona con la alta actividad de iones aluminio monómeros de alta toxicidad (Cruz-Flores, 2006).

Existen condiciones específicas típicas de los suelos, por su origen, tales como los derivados de productos volcánicos con propiedades distintivas como carga variable, alta retención de agua y fosfatos, alto contenido de materia orgánica, estabilidad en sus agregados y generalmente son considerados excelentes suelos para la agricultura (Cruz-Flores & López-López, 2015).



En general, los suelos volcánicos contienen altos contenidos de materia orgánica que se descompone y pone a disposición entre el 2 y 5% de N en forma de amonio y este puede ser aprovechado por las plantas por acción de bacterias selectivas que oxidan el amonio a nitratos o, absorbido por la superficie de las arcillas que están cargadas negativamente (Cruz-Flores, 2006).

Otra de las condiciones que limita la asimilación del N es cuando el suelo se encuentra en condiciones inundadas y el oxígeno comienza a ser un limitante (anoxia) y se forman otras especies alternativas como el metano CH_4 , hierro Fe^{2+} , nitritos NO_2^- , sulfuro H_2S siendo así el agua en el suelo un limitante en la difusión del oxígeno a través del perfil del suelo y del intercambio de iones (Dontsova, Balogh-Brunstand & Gaël Le Roux, 2020).

En los suelos congelados, el hielo actúa como una barrera que congela el agua y se descongela estacionalmente, por lo que muchos de los suelos que por las condiciones edafo-climáticas en las que se desarrolla permaneciendo en condiciones de anoxia periódica debido a la saturación periódica que sufre y la rapidez con la que se drenen los suelos (Street *et al.*, 2016).

En particular, los nutrientes se liberan en el suelo durante el proceso de descomposición de los exudados radiculares lo que origina el aumento de las concentraciones de CO_2 y N_2 (Jiang *et al.*, 2021).

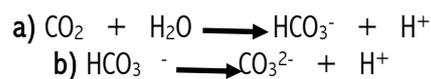


El ciclo del carbono en la relación suelo-planta

El carbono (C) es el nutriente más importante en el planeta Tierra (Dolman, 2019) en su forma orgánica se encuentra mayormente en el suelo (COS) siendo un indicador de la fertilidad y calidad de este (Jiang *et al.*, 2021). Sin embargo, desde finales del siglo XX comenzó a dificultarse el entendimiento del ciclo del C debido a los problemas de deforestación, desmonte y despalme (Arnold, *et al.*, 1990) aunado a que los procesos clave se llevan a una escala de tiempo que dura menos de un siglo.

En la actualidad se ha comprobado que el aumento de la perturbación antropogénica está estrechamente relacionado con los cambios en el ciclo natural del C siendo responsables las actividades que se realizan en la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo, además de que los gases CO₂ y el CH₄, junto con el vapor de agua, definen las propiedades radioactivas de la atmósfera manteniendo la temperatura global por encima de la congelación (Dolman, 2019).

Otro aspecto importante por considerar en el ciclo de C durante los cambios antropogénicos es lo ocurrido en el océano debido a que proporciona un puente entre el ciclo geológico y el biológico debido a que los sedimentos carbonatados se organizan a través del movimiento de placas y proporcionan nuevo dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera que al diluirse en agua forma bicarbonato, jugando un papel importante el pH del océano que se explica en la siguiente expresión química (Donald, 2019):



El pH juega un papel fundamental en esta reacción, a) si es más ácido tiende a absorber menos CO₂, mientras que, b) en pH alcalinos empujará la reacción a la producción de carbonatos. En valores típicos de pH = 8,2 la reacción está en equilibrio produciendo 0.5% de CO₂ disuelto, 89% de carbonatos y 10.5% de bicarbonatos (Dolman, 2019).

Otro punto clave para el reciclaje de C en el océano es la producción de carbonatos de origen marino como son las algas coralinas (calcita de magnesio), corales y pterópodos (aragonita), cocolitóforos y foraminíferos (calcita), que al morir se hunden transportando así carbono a los sedimentos del océanos hasta ser removido por las placas tectónicas (Dolman, 2019).

El carbono terrestre que es almacenado en la vegetación es una variable importante para el entendimiento en el reciclaje del C (Dolman, 2019) pues de los 16 elementos que forman mayormente la materia orgánica, el carbono, oxígeno e hidrógeno interactúan de manera esencial en el crecimiento de las plantas y lo toman del CO_2 atmosférico durante la fotosíntesis y el H_2O del suelo (Cruz-Flores, 2006).

La vegetación fija el carbono de la atmósfera por fotosíntesis, comenzando así un ciclo de transporte a la materia viva de las plantas por lo que una vez que la vegetación muere, los organismos del suelo descomponen esta materia transformándola a materia orgánica del suelo como se muestra en la figura 12 (FAO, 2022).

Durante el crecimiento y absorción del C dado en los bosques se puede resaltar tres mecanismos esenciales que dan origen a una mayor deposición y los cambios sustanciales pueden modificar las concentraciones de dióxido de C en la atmósfera e influir en el ciclo del C (Jian *et al.*, 2021) haciendo que provoque: 1) la estimulación de la fotosíntesis mediante la mayor disponibilidad de N, 2) el cambio en la composición y estructura que forma el C, pasando de las raíces finas al cuerpo leñoso y, 3) procesos donde interviene la respiración del suelo (Dolman, 2019).

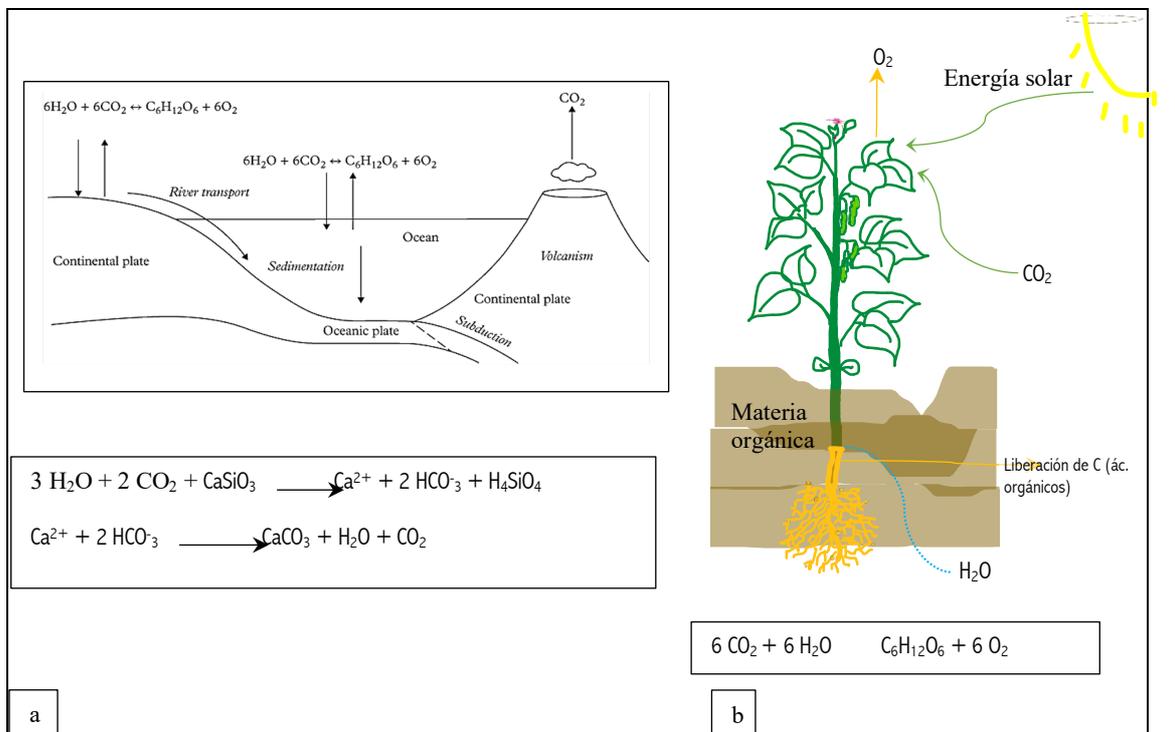


Figura 12. a) La ecuación muestra como el carbonato y el silicato actúa para disolver el calcio produciendo por una molécula de CO_2 proporcionando un mecanismo en la eliminación del CO_2 atmosférico b) Fotosíntesis. Tomado y modificado de Dolman, 2019.



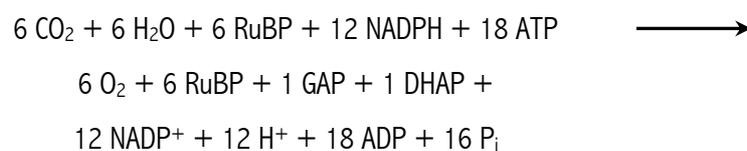
Es fundamental la comprensión de esta ecuación vista desde la producción de oxígeno y azúcares a través de la fotosíntesis oxigenada de los organismos autótrofos, que, junto con el proceso de respiración inversa de los organismos heterótrofos ya que el equilibrio de estos dos procesos determina la cantidad de C y O en los depósitos superficial superficiales. Dolman, 2019.

Por otra parte, la fotosíntesis es un proceso que a través de la captura de CO₂ produce azúcares y energía que, junto con el agua y los elementos minerales absorbidos por las raíces constituyen la base para el crecimiento formando carbohidratos, algunos aminoácidos, ácidos grasos que se sintetizan en el cloroplasto a partir del C fijado en la fotosíntesis, a esto se le conoce como Producción Primaria (Figura 12, b) (Azcón-Bieto & Talón, 2008; Dolman, 2019). En general, el dióxido de carbono se incorpora desde la atmósfera a través de los estomas además de energía lumínica transformada en ATP y NADPH para sintetizar carbohidratos.

El ciclo del C y el agua están vinculados con el clima debido a que el aumento de la temperatura conlleva un aumento de la precipitación (capacidad de retención del agua en la atmósfera) y por lo tanto se elimina más dióxido de C, es por esta razón que es tan importante el equilibrio de esta ecuación ya que se refleja el control del clima de la Tierra (Figura 11. b) (Dolman, 2019).

La ruta de asimilación, así como intermediarios y las enzimas que catalizan, del CO₂ está descritas en tres etapas: 1) la fijación del CO₂ debido a la acción de la Ribulosa-1,5-bifosfato (RuBP), 2) la reducción del carbono fijado a hidratos de carbono que requieren aporte de energía en forma de ATP y, 3) la regeneración de RuBP que también requiere aporte de ATP (Azcón-Bieto & Talón, 2008).

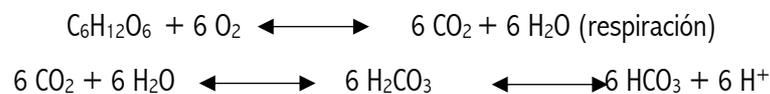
La incorporación del CO₂ a la RuBP se denomina carboxilación catalizado por una enzima denominada ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa (RubisCO) que es crucial para la fotosíntesis debido a que su catalización es clave en la fotosíntesis por la asimilación y fijación del CO₂ en la vía de la fotosíntesis de carbohidratos (Dolman, 2019) y, en resumen se pueden ver expresados los procesos en la siguiente ecuación donde las triosas fosfato son utilizadas para la síntesis de sacarosa y almidón, considerados los principales productos terminales de la fotosíntesis (Azcón-Bieto & Talón, 2008):





La síntesis de sacarosa y otros productos finalmente son transportados a través de floema teniendo lugar en el citosol y con la salida del ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA) facilita la entrada del fósforo orgánico denominado por ello translocador de fosfato, de este modo, el exceso de triosa fosfato que no se utiliza en la síntesis de sacarosa se convierte en almidón que actúa como sustancia de reserva de carbono ocupado en el propio cloroplasto, por lo que, el cloroplasto proporciona de energía a la planta tanto de día como de noche (Azcon-Bieto & Talón, 2008).

La descomposición microbiana de la MO se da a través de la actividad respiratoria de los microorganismos del suelo que produce ácidos orgánicos y CO₂ que finalmente formará ácido carbónico (H₂CO₃) (Osorio, 2012):



La aparición de la vida y al del ser humano ha intervenido drásticamente en el ciclo del C al poner su funcionamiento en los límites para el sostén de la misma con la aparición de gases efecto invernadero, ozono y aerosoles, esto aunado a que los mecanismos de absorción del C por la vegetación y los océanos son de vital importancia en el fenómeno del cambio climático (Dolman, 2019). En esta sintonía el suelo también puede ser una espada de doble filo al funcionar como sumidero o fuente de gases efecto invernadero o fuente de ellos como el CO₂ y el CH₄ que son dos de los principales gases efecto invernadero de mayor origen antropogénico (FAO, 2017).

En el tiempo, las actividades antropogénicas, las perturbaciones periódicas, los incendios reducen la Producción Primaria a menos de 0.5%, no obstante, se ha demostrado que 25 años después de la perturbación de un ecosistema puede seguir perdiendo C almacenado y, cuando las pérdidas de CO₂ disminuyen, los bosques regresan a absorber C por lo que para los bosques antiguos es importante la perturbación en su ciclo natural de vida (Dolman, 2019).

Finalmente, la asimilación de CO₂ es el primer paso para la formación de nueva biomasa y la fijación del C en los organismos heterótrofo. El proceso de fotosíntesis funciona de manera eficiente en un medio donde existe una enorme variabilidad de factores que intervienen como la luz, la temperatura, la humedad del aire, la disponibilidad hídrica y de nutrientes en el suelo, a lo que puede añadirse el dióxido de carbono (Azcón-Bieto & Talón, 2008) y, de ser alterado, contaminado, disminuido o acelerado alguno de estos factores se vería afectado el ciclo del C de manera negativa para las condiciones necesarias para la vida (Dolman, 2019)

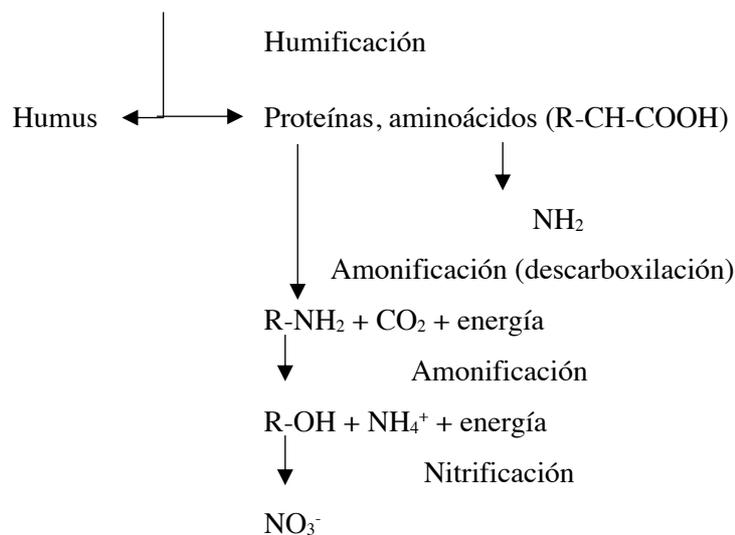


El ciclo del nitrógeno en la relación suelo-planta

Uno de los elementos más importantes para la nutrición de las plantas en el suelo es el nitrógeno debido a su participación en biomoléculas fundamentales para la vida como aminoácidos, proteínas, enzimas (como la RuBisCo) y ácidos nucleicos. La principal fuente de nitrógeno está en la atmósfera, en su forma elemental, y no se encuentra disponible para las plantas debido a sus tres enlaces químicos que, de manera natural, son rotos por fuentes de energía como explosiones volcánicas o energía liberada a través de rayos (Celaya-Michel & Castellanos-Villegas, 2011).

Normalmente del 97% al 99% del nitrógeno total del suelo se encuentra en formas orgánicas muy complejas que, al mineralizarse, libera nutrientes que entre ellos se encuentra el nitrógeno y se relaciona con el contenido de materia orgánica y su fertilidad y puede esquematizarse de la siguiente manera (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009):

Residuos animales y vegetales



Sin embargo, las plantas superiores encontraron un mecanismo para la asimilación haciendo simbiosis con organismos de vida libre capaces de fijar nitrógeno atmosférico que representa una gran entrada de nitrógeno al sistema biótico. El proceso de fijación del nitrógeno es complejo y depende, además de los microorganismos, de factores como el pH y el propio origen del suelo (Celaya-Michel & Castellanos-Villegas, 2011).

El nitrógeno puede asimilarse por las plantas en forma de nitrato (NO_3^-) o como amonio (NH_4^+) (Baca *et al.*, 2000; Azcón-Bieto & Talon, 2008; Dolman, 2019; FAO, 2022), siendo los nitratos la principal forma nitrogenada absorbida por las plantas (Cruz-Flores, 2006) y al igual que el ciclo del C, el ciclo del N se sufrió un cambio drástico con la aparición de la vida y posteriormente,



con la del ser humano por ejemplo con el aumento de gases efecto invernadero como el óxido nitroso (Dolman, 2019).

Aunado a estas recientes alteraciones en el ciclo, en suelos ácidos se presenta un problema debido a la baja mineralización de materia orgánica por lo que en regiones con esta característica se manifiesta un problema de desabastecimiento de nitrógeno además de que la materia orgánica del suelo solo pone disponible del 2 al 5 % de N anualmente por descomposición (Cruz-Flores, 2006).

La atmósfera contiene 10^{15} toneladas de gas N_2 y el ciclo del nitrógeno involucra la transformación de unas 3×10^9 toneladas de N_2 por año, cifras que reflejan que un 60% de la transformación de N se da a través de la fijación biológica (FBN), seguido de la industria de los fertilizantes 25% y las radiaciones UV 10% (Baca *et al.*, 2000) por lo que el ciclo del N está controlado principalmente por las actividades microbianas y el reciclaje del elemento a través de la asociación de las bacterias a las plantas (Dolman, 2019).

En el proceso de FBN los organismos intervienen reduciendo el N atmosférico en amonio después otros organismos aerobios intervienen en el ciclo oxidando el amonio a nitratos que, de esta última forma, existen dos vías para formar dinitrógeno (desnitrificación) que puede suceder por bacterias quimioautotróficas anaeróbicas y la vía de transformación anammox donde los átomos de nitrito y amonio se combinan para formar dinitrógeno (Dolman, 2019).

Uno de los fenómenos biológicos que permite la disponibilidad de nitrógeno en los organismos es la fijación biológica de nitrógeno realizada por organismos procariontes (Baca *et al.*, 2000), éstos aprovechan la posibilidad de encontrar N_2 atmosférico, romper el triple enlace y fijarlo a a las plantas gracias a la simbiosis (Azcón-Bieto & Talon, 2008; Dolman, 2019). Para romper el triple enlace se requiere de energía que es proporcionada por las raíces en forma de azúcares y así la planta se beneficia de los nutrientes proporcionados (Dolman, 2019).

Algunas de las familias más reconocidas de microorganismos fijadores de nitrógeno son *Bradyrhizobium* (Bermúdez-Torres *et al.*, 2015) *Rhizobium* y *Frankia* (Azcón-Bieto & Talon, 2008). Como se observa en la figura 13a., ciertos tipos de ellas tienen estilos de vida diversos y pueden ser encontrados en suelos, océanos, lagos, sedimento o intestinos de termitas (Dolman, 2019).

Sin embargo, todos los microorganismos fijadores de nitrógeno poseen el sistema enzimático responsable de la reducción del nitrógeno: la nitrogenasa, que rompe el triple enlace del N_2 en condiciones aerobias o anaerobias (Baca *et al.*, 2000; Dolman, 2019). Esta simbiosis se da por la

liberación de sustancias flavonoides a través de la raíz de la planta que son reconocidas por los microorganismos que sintetizan factores de nodulación (genes nod) a nivel del cortex ilustrado en la figura 13b. (Celaya-Michel & Castellanos-Villegas, 2011; Baca *et al.*; 2000).



Figura 13. a) Nódulos de la raíz de *Lupinus* que muestra la presencia de microorganismos simbióticos de *Bradyrhizobium*. (Megías *et al.*, 2018). b) Corte transversal de la raíz de *Lupinus* donde se aprecia el cilindro vascular (xilema y floema) así como el cortex.

Las estimaciones realizadas sobre las tasas de fijación biológica de nitrógeno, se reportan en 200 millones de toneladas por año, lo cual equivale a dos veces la producción de fertilizantes nitrogenados que se producen industrialmente (Baca *et al.*, 2000) por lo que la FBN es un proceso importante para la obtención de nitrógeno asimilable.

Por otra parte, una forma de fijación de N se da en organismos autótrofos que pueden tomar nitrógeno atmosférico a través de las estomas cuando se da la absorción de amoníaco (NH_3) que se convierte en amonio (NH_4^+) (Azcón-Bieto & Talon, 2008) siendo estos dos procesos, fijación biológica y respiración, siendo estas las dos formas de FBN.

El nitrógeno, que es fijado por procariontas y microorganismos con enzimas hidrogenasas “convencionales” sensibles al oxígeno (Baca *et al.*, 2000), al entrar en los espacios porosos a través del aire se encuentran en el suelo, pudiendo tener contacto con la rizósfera y así comenzar los procesos de fijación.

Existen fenómenos que se deben contemplar por la naturaleza de las condiciones donde se encuentran, por ejemplo, en los suelos que tienen a estar congelados debido a las condiciones climatológicas de la región, existe una acumulación de materia orgánica que se descompone lentamente (Dontsova *et al.*, 2020) disminuyendo la aportación de nitrógeno en su forma asimilable para las plantas por procesos de descomposición de materia orgánica.

Sin embargo, el Estado Global del Clima (WMO) en 2021 reporta que se han iniciado procesos de descomposición de MO por aumentos de 0.9 a 1.8 °C en la temperatura global, esto provocaría que el descongelamiento de estas zonas aumente la disponibilidad de nitrógeno, al aumentar el calor también aumentará la disposición de materia orgánica que puede ser mineralizada por microorganismos para liberar N inorgánico con el tiempo, esto es ilustrado en la figura 14 (Dontsova *et al.*, 2020).

El deshielo que ocurre con el aumento de temperatura arrastra la materia orgánica que aún no se mineraliza, y con ello el nitrógeno contenido, hacia el cauce del río por lo que el ciclo del nitrógeno está fuertemente controlado por las condiciones redox que se provoca en los suelos congelados influyendo en una escala local (Dontsova *et al.*, 2020).

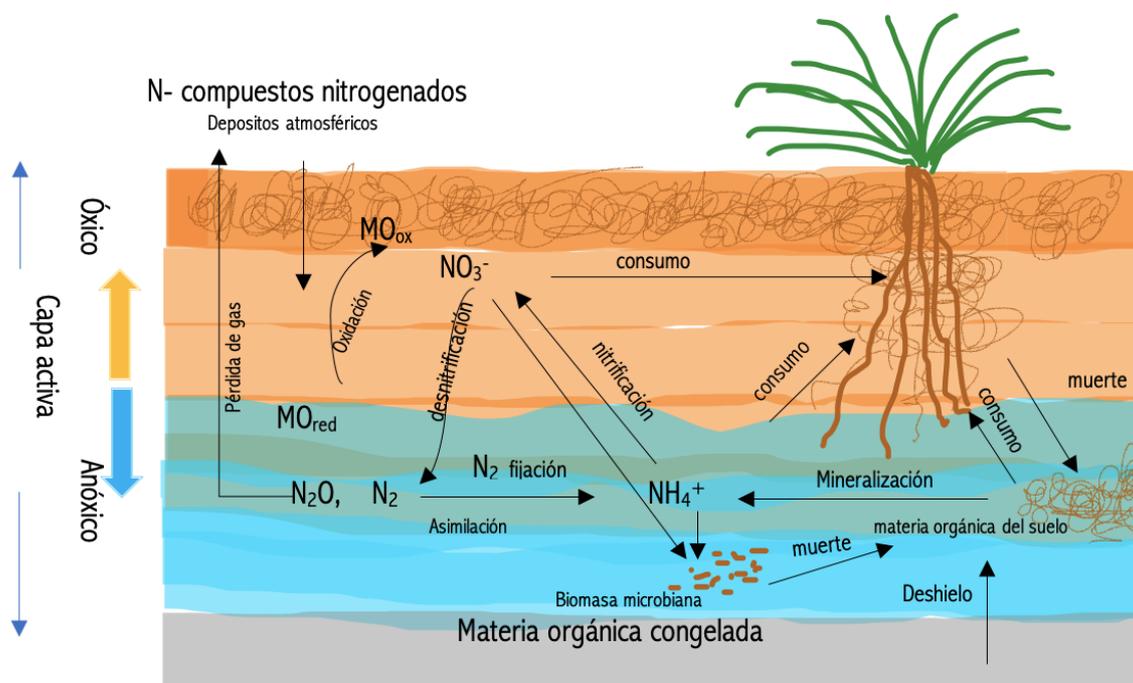


Figura 14. Resumen de las transformaciones biogeoquímicas del N esperadas en las reacciones redox. Tomado y modificado de Dontsova *et al.*, 2020.

En la figura 15 se muestra que una vez que la materia orgánica se mineraliza comienza la absorción del nitrógeno por las plantas, así pues, el reparto de la asimilación del nitrato consta de tres etapas: 1) absorción, 2) reducción del nitrato a amonio y, 3) incorporación de amonio a esqueletos carbonados para la síntesis de aminoácidos llamado asimilación del amonio (Azcón-Bieto y Talon, 2008).

Además, el transporte de las moléculas de nitrógeno hacia el interior es dependiente de la energía metabólica y, su movilidad se debe a una permeasa, que, con el cambio de pH externo mediante la salida de protones ayudan a transportar nitrato al interior (Azcón-Bieto & Talon, 2008).

La regulación recíproca entre el metabolismo del carbono y del nitrógeno permite a la planta coordinar las velocidades de biosíntesis de carbohidratos y de aminoácidos con la finalidad de mantener el balance interno C:N (Azcón-Bieto & Talon, 2008) siendo esta una clara interacción entre el ciclo del carbono y el nitrógeno donde las plantas proveen de azúcares que se producen en la fotosíntesis para que las bacterias puedan fijar nitrógeno (Dolman, 2019).

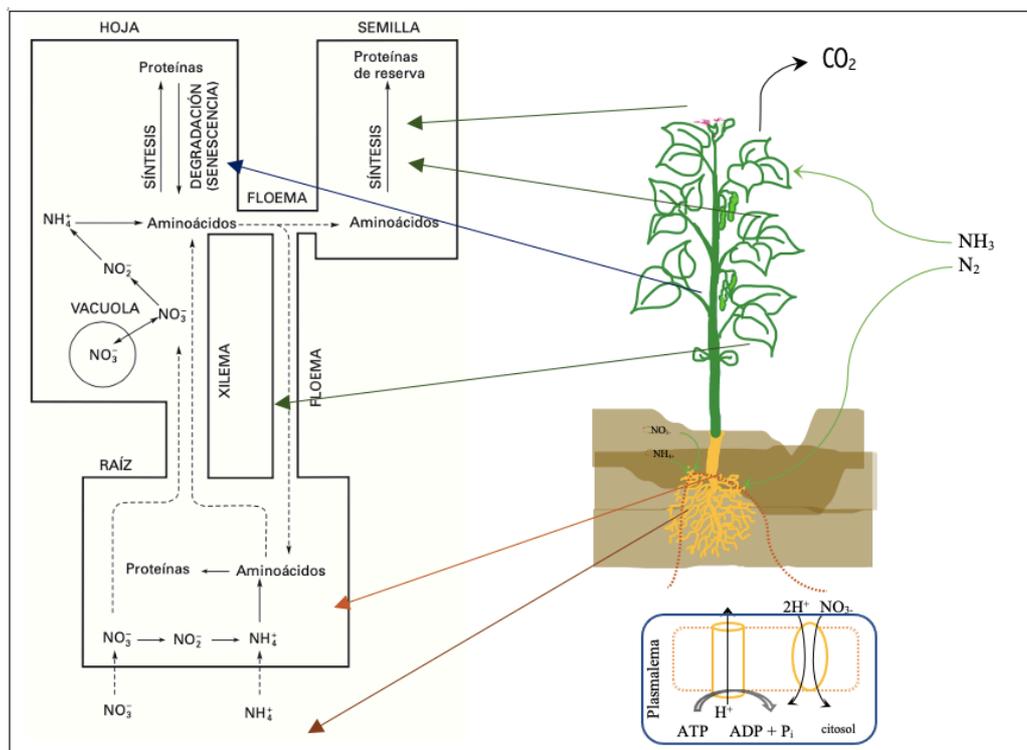


Figura 15. Rutas que sintetizan la absorción, asimilación, movilización y transporte del nitrógeno a través de la planta. Tomado y modificado de Azcón-Bieto & Talon, 2008.

En la asimilación es necesario el poder reductor del ATP, suministrados durante la fotosíntesis, así como cadenas de carbono producidas por la reducción fotosintética del carbono que origina un flujo de carbohidratos hasta aminoácidos que serán utilizados a lo largo de su crecimiento y desarrollo, así pues, la movilización del nitrógeno orgánico desde las raíces, tallos y las hojas hasta las semilla es un proceso muy importante en la economía del nitrógeno de las plantas (Azcón-Bieto & Talon, 2008).

En ausencia de fotosíntesis el almidón o la sacarosa suministran el carbono para el aminoácido, por otra parte en la luz los azúcares constituyen la fuente última para la síntesis de aminoácidos,

así pues, en los tejidos fotosintéticos el carbono asimilado se reparte entre la síntesis de aminoácidos y la formación de carbohidratos y ambas condiciones se regulan a través de enzimas que dan como producto final la glutamina y asparragina, estos aminoácidos conectan el metabolismo del carbono y el nitrógeno (Azcón-Bieto & Talon, 2008).

Como se observa en la Figura 16, la luz influye en la producción de aminoácidos siendo así que en condiciones de luz con suficiente carbono la razón C:N es alta, lo que induce la síntesis de glutamina, en cambio en la oscuridad hay una razón baja de C : N favoreciendo la asparragina (Azcón-Bieto & Talon, 2008).

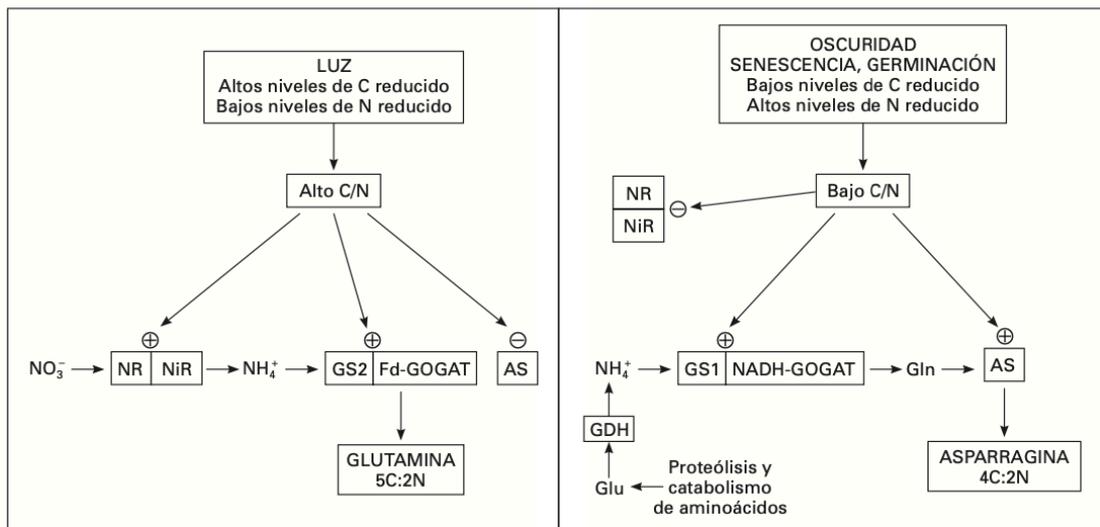


Figura 16. Regulación diferencial de la síntesis de glutamina y de asparragina por la disponibilidad de carbono y nitrógeno reducido. Tomado de Azcón-Bieto & Talon, 2008.

AS: asparragina sintetasa; GHD: glutamato deshidrogenasa; Gln: glutamina, GOGAT: glutamato sintasa; GS1 y GS2: isoformas citosólica plastídica, respectivamente, de la glutamina sintetasa; NiR: nitrito reductasa; NR: nitrato reductasa.

Además las plantas a través de las raíces, y algunos microorganismos que pueden hacer simbiosis, tienen la capacidad de reducir nitratos (NO_3^-) a amonio (NH_4^+) e incorporarlas a moléculas orgánicas siendo estas las principales formas de N (Cruz-Flores, 2006), a esto se le llama asimilación del nitrato, que es característico de cada especie, por ejemplo, el género *Lupinus* y otras especies leñosas gimnospermas asimilan por la raíz la mayor parte de nitrato y a medida que crece la planta puede que la asimilación sea mayor en las hojas que en la raíz (Azcón-Bieto & Talon, 2008).

En general, los mejores organismos fijadores de N son los que establecen simbiosis con plantas superiores debido a que ellas proporcionan la energía y la protección del O_2 , además este elemento controla la fertilidad del suelo por lo que la FBN se define como una manera más efectiva, menos cara y no contaminante para mejorar la fertilidad del suelo (Baca *et al.*, 2000).



El ciclo natural del nitrógeno se ha visto afectado drásticamente por la actividad humana cuando Haber y Bosch en 1931 crearon un procedimiento con el cual podrían producir amoníaco combinando dinitrógeno, alta temperatura y presión para solventar la demanda de alimento para la población mundial en crecimiento exponencial (Dolman, 2019), este proceso es resuelto por las plantas superiores en simbiosis con microorganismos de vida libre que se encuentran en el suelo que es de vital importancia cuando el nitrógeno es limitado en el suelo así, la planta se beneficia de la simbiosis y al morir, aporta N al suelo.



El ciclo del fósforo en la relación suelo-planta

El fósforo (P) es un elemento importante en el desarrollo y nutrición vegetal, su deficiencia puede provocar severos daños en el trastorno fisiológico de las plantas aunado a esto, la mayoría de los suelos son deficientes en fósforo asimilable por lo que, para la productividad humana, se ha recurrido al uso de fertilizantes fosforados para cumplir con los niveles de productividad (Fernández, 2007; Alcántar & Trejo-Téllez, 2009).

En el suelo el reciclaje del fósforo por la acción de microorganismos hace que el fósforo esté disponible una y otra vez, en el océano el reciclaje ocurre en la parte superior y otra fracción queda sepultada y en la atmósfera casi nada reside en ella (Dolman, 2019) de aquí, parte la importancia de la comprensión de la asimilación del fósforo en la relación suelo-planta.

Además, el fósforo es de vital importancia debido a que forma parte de la estructura del ADN y ARN en la estructura de las proteínas de cualquier organismo vivo, además de ser parte de los portadores de energía ADP (adenosina difosfato) del ATP (trifosfato de adenosina) que en los organismos autótrofos genera una importante participa en la fotosíntesis y por tanto, en la generación de células nuevas (Cruz-Flores, 2006; Fernández, 2007; Dolman, 2019).

Para las plantas, el P tiene principalmente impacto en la fotosíntesis y almacenamiento de C siendo su principal fuente de suministro las rocas que originan el suelo, poniendo disponible este elemento gracias a la acción de génesis del suelo ocurrida en millones de años, por lo que el P se vuelve el elemento limitante si lo comparamos con el N que se puede ser dispuesto más rápidamente (Dolman, 2019).

Se estima que en el suelo hay aproximadamente 0.05 ppm siendo una pequeña parte lo que se pone en contacto con las raíces para ser asimilada prontamente, sin embargo, es de vital importancia para el suelo la relación N:P debido a que es un indicador del estado del sistema (Fernández, 2007). Como se ve en la Figura 10, el flujo de masa del elemento, en este caso el P, se verá condicionado por el agua y su difusión por lo que el aporte estará condicionado por las concentraciones de este elemento en el suelo.

Uno de los procesos importantes en el ciclo del P es la mineralización, su paso de compuestos inorgánicos que pueden ser usados por las plantas o absorbido por el suelo, Ambos procesos pueden entrar en competencia (Dolman, 2019) haciendo que este no esté disponible en décadas o siglos.



Las plantas pueden tomar el nitrógeno del suelo en forma de nitrato o amonio y esto se relaciona con las propiedades del suelo, por ejemplo, en los suelos alcalinos aumenta la solubilidad del P como consecuencia de los procesos de nitrificación, por lo que el amonio pone en mayor disposición al P, esto indicaría que la planta absorbe N en forma de amonio mayormente haciendo que la entrada de cationes aumente la exudación de protones jugando así un importante papel en el pH de la rizósfera (Fernández, 2007).

Las raíces de las plantas absorben el P principalmente en ortofosfatos (H_2PO_4^-) primario y ortofosfato secundarios (HPO_4^{2-}) que generalmente se encuentran en intervalos de entre 0.1 y 10 $\mu\text{mol l}^{-1}$ aunque pueden ser precipitadas (Cruz-Flores, 2007) que, para estos aniones el pH influye enormemente en la manera en la que son absorbidos por las plantas siendo los pH básicos donde hay menor disponibilidad de P debido a que precipita junto con cationes de Ca^{2+} o Mg^{2+} y, por el contrario en pH ácidos aumenta su solubilidad (Fernández, 2007) así pues, la toma debe ser seguida de la transferencia a través de la raíz al xilema.

El fósforo, a diferencia del nitrógeno, no se reduce en las plantas, sino que permanece en su estado de oxidación mayor presentándose como ortofosfatos o polifosfatos imprescindible en la germinación de las semillas (Fernández, 2007) además, la cantidad de fósforo en el suelo se relaciona estrechamente con la cantidad de MOS en forma de esteroides, fosfolípidos, ácidos nucleicos, azúcares fosforilados, derivados de ácidos fosfónicos y complejos orgánicos (Cruz-Flores, 2006).

Una vez que el fósforo se encuentra en ortofosfatos es tomado por la planta por dos procesos: flujo de masa y difusión aportando del 1% al 20% a la nutrición del fósforo en las plantas que, una vez absorbido por las plantas, se ve perturbada la cantidad en el suelo que es repuesta por el fósforo lábil de fácil disponibilidad (Cruz-Flores, 2006).

Los sulfatos absorbidos no son reducidos, como es el caso de los nitratos, permanecen como fosfatos inorgánicos que pasan a cadenas carbonadas (C-O-P) como una fosfoazúcar o llevados a cadenas como pirofosfatos (ATP) (Figura 17) además son importantes en las macromoléculas de los ácidos nucleicos como base de la información genética (Cruz-Flores, 2006)

Otra función importante para la célula en la que participa el fósforo siendo un elemento estructural (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009) es capa de las células, debido a que forman parte de la estructura de las biomembranas en la región lipofílica (dos cadenas largas de ácidos grasos) y en la región hidrofílica (Cruz-Flores, 2006), siendo de gran importancia no solo para la estructura celular sino en el intercambio intra y extracelular.

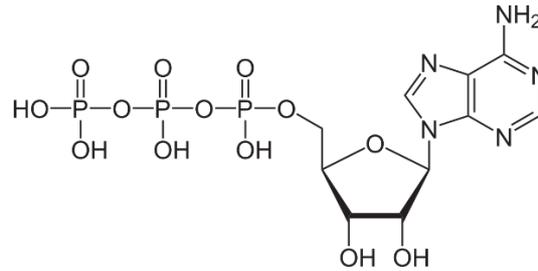


Figura 17. Nucleótido esencial para la obtención de energía compuesta por grupos fosfatos que son importantes en la estructura del nucleótido para la obtención de la energía en la célula. Tomada de https://es.wikipedia.org/wiki/Adenos%C3%ADn_trifosfato

El fósforo reacciona con grupos OH de diferentes moléculas, principalmente con azúcares para formar algunos compuestos de alta energía que participan en numerosos procesos metabólicos en forma de nucleótidos como son el ATP, GTP, UTP que intervienen en reacciones de transferencia de energía (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).

Las moléculas de ATP requeridas para la síntesis de almidón o para la suministración de iones es suministrada principalmente por enzimas de ATP así mismo, la energía liberada durante la glicólisis, respiración o la fotosíntesis ricos en energía que pueden liberar en la hidrólisis aproximadamente 30 kJ mol^{-1} (Cruz-Flores, 2006).

El fósforo inorgánico (Pi) es esencial para la regulación de las rutas metabólicas en el citoplasma y en el cloroplasto que en las plantas superiores se encuentra del 80 al 85% en las vacuolas y el cloroplasto (Cruz-Flores, 2006) como se puede observar en la figura 18 que muestra cómo, a través de las raíces, el fósforo puede pasar a la membrana celular y ser almacenado en las vacuolas o participar en la fotosíntesis como energía para formar celulosa (Espinoza-Barrera & Chávez-Sahagún, 2019).

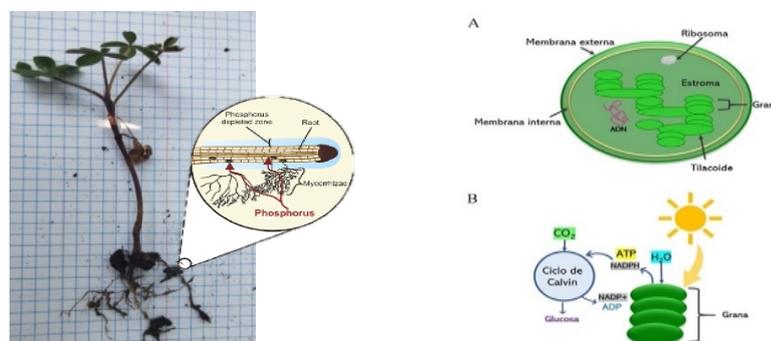
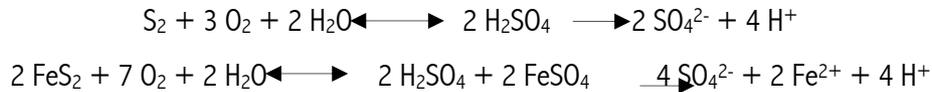


Figura 18. Las raíces de las plantas superiores fijan fósforo a través de ellas y a mayor formación de raíces secundarias, mayor es la superficie de contacto en la búsqueda de alimento. Modificado de Espinoza-Barrera & Chávez-Sahagún, 2019.

Finalmente, se podría evitar el uso de fertilizantes fosfatados con el conocimiento del ciclo, así como el de microorganismos que habitan en el suelo para hacer uso eficiente del fósforo (Roy-



Bolduc y Hijri, 2011). Por ejemplo, en la oxidación microbial de S₂ y sulfuros: las bacterias del género *Acidithiobacillus* oxidan los compuestos azufrados y forman ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Osorio, 2012):



En los suelos donde abundan los sulfuros (pirita, calcopirita, galena) en condiciones aeróbicas (drenadas) permiten la formación de suelos sulfuro ácidos (Osorio, 2012), con el conocimiento de microorganismos que participan en el ciclo biológico del fósforo que, oxidan y reducen el elemento se podría aprovechar de manera eficiente a los fertilizantes fosfatados.

Cruz-Flores, (2006) reporta que las concentraciones de fósforo van de 0.3 a 0.5% en el suelo y con esto las plantas crecen a un nivel óptimo, otros autores mencionan que el uso de micorrizas en las plantas cultivadas puede mejorar la asimilación de este y aumentar el follaje y la cantidad de semillas (Roy-Bolduc & Hijri, 2011).

Un problema al que se enfrenta el ciclo natural del fósforo es el aumento de la entrada de N debido a los fertilizantes que ha causado un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos, esto debido a que la adición de este, a través de fertilizantes nitrogenados, no aumenta el rendimiento de la producción primaria porque el P se vuelve el elemento limitante (Dolman, 2019).

En el ciclo del fósforo ha sido alterado por la actividad antropogénica al usar fertilizantes que se extraen principalmente del guano (12-17 ton P año⁻¹) en su gran mayoría termina en los océanos (13.5-15 ton P año⁻¹) y, a diferencia de otros elementos, el P es reciclable por lo que se estima que para el 2050 será extraído un 50% del P mineralizable (Dolman, 2019) dando paso a una premisa, encontrar una estrategia que ayude al reciclaje del P de manera imprescindible.

Jian *et al.*, 2021 mencionan que la relación C:P es un buen indicador de la medida en la que se libera el P del suelo mediante la mineralización y esto tiene un fuerte impacto en el desarrollo de las plantas. De continuar con las prácticas de fertilización, y la extracción de fósforo que se realiza en la actualidad, el recurso podría agotarse en 50 a 125 años (Roy-Bolduc & Hijri, 2011).



Eficiencia nutricional de los nutrimentos en las plantas

Cruz-Flores, (2006) define a la eficiencia nutricional como la capacidad de producir biomasa por unidad de un nutrimento mineral fijado y se asocian con procesos fisiológicos que están relacionados con la respuesta a diversos factores en el medio ambiente y factores de la variación genética como rasgos morfológicos, por ejemplo. Un cuadro que resume los posibles mecanismos en las estrategias de las plantas para la fijación de nutrimentos.

Las estrategias que los organismos heterótrofos utilizan para absorber un mayor nutriente se ven reflejados principalmente en la raíz donde ocurre el transporte para la parte aérea para sustentar la demanda celular, el crecimiento y finalmente la translocación en las semillas (Cruz-Flores, 2006)

Además, la adquisición de nutrimentos, dada principalmente por la raíz, modifica su estructura y la rizosfera en respuesta a la deficiencia influyendo de manera pasiva influyendo en la absorción o activa secretando quelantes y compuestos reductores (Cruz-Flores, 2006)

Los macronutrientes se requieren en grandes cantidades para el desarrollo y crecimiento de las plantas, entre los que encontramos al Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N), Fósforo (P), además del Potasio (K), como nutrientes esenciales y al Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S) como macronutrientes secundarios, todas las plantas necesitan nutrientes para sobrevivir y crecer (Cruz-Flores, 2006; Fernández, 2007; Alcántar & Trejo-Téllez, 2009; Sharma & Kumar, 2011, FAO, 2022).

Alcantar y Trejo-Téllez (2009) mencionan que la disponibilidad nutrimental en el medio de crecimiento y el contenido del nutrimento en la planta, usando métodos de análisis foliar, pueden diagnosticar la disponibilidad nutrimental en el suelo para que la planta pueda disponer de ellos durante el desarrollo con la finalidad de establecer el origen de una anomalía que puede tener origen en el exceso o deficiencia de un nutrimento.

En las plantas superiores se puede encontrar que la mayor composición de ellas es agua, del 80% al 90% donde la menor acumulación está en las semillas por lo que realizan una menor actividad metabólica o por ser sistemas de latencia (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).

Idealmente, las plantas con mayor eficiencia para aprovechar nutrientes son aquellas que bajo condiciones anormales o adversas para la nutrición, translocan mejor un nutriente y así producen una mayor masa o cantidad de grano (Fernández, 2007). En los cultivos de interés agrícola es de

interés maximizar el potencial genético de las plantas durante su desarrollo y la nutrición que le proporcionan los minerales le va a permitir crecer en las mejores condiciones o viceversa (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).

Sin embargo, las plantas requieren de los nutrientes esenciales en proporciones equilibradas para un buen desarrollo y la deficiencia de ellos no satisface los requerimientos de crecimiento por lo que se presentan síntomas vasculares que muestran su falta (Alcántar & Trejo-Téllez, 2009; Sharma & Kumar, 2011), por lo que los síntomas en la deficiencia de estos pueden facilitar su reconocimiento visual o usar técnicas de análisis foliar (Alcántar & Trejo-Téllez, 2009).

En el reconocimiento visual en la deficiencia o exceso (Figura 19) de los nutrimentos puede ser una herramienta sencilla de utilizar, sin embargo, existen problemas como la llamada “hambre oculta” que es una deficiencia latente difícil de detectar sin la ayuda de análisis químico foliar, además de que se enmascaran los síntomas o pueden ser confundidos con otras enfermedades como hongos o virosis (Alcántar & Trejo-Téllez, 2009).

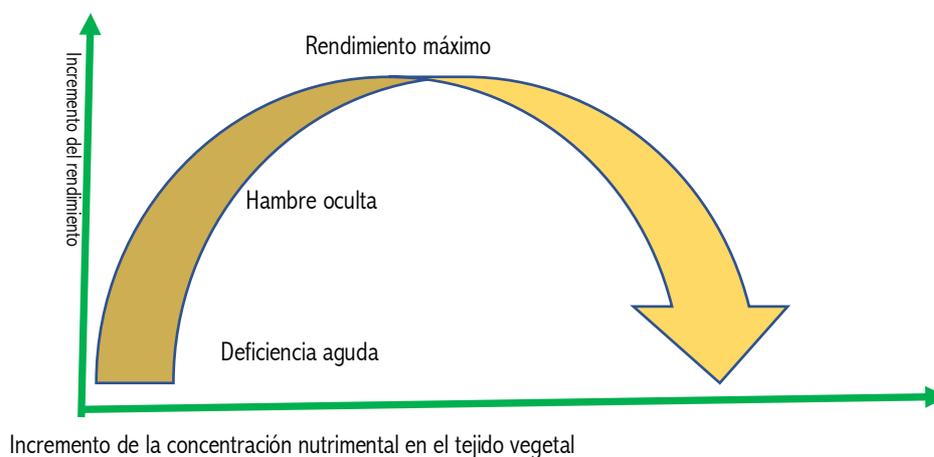


Figura 19. Consideraciones para el diagnóstico visual de los nutrimentos (Modificado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009)

Fernández (2007) indica que algunos factores limitan la disposición de nutrientes como el daño por insectos o virus, el uso de herbicidas, daño por insectos, baja de temperaturas y algunas condiciones del suelo como el exceso de humedad el cambio de pH o la compactación.

Las plantas utilizan estrategias cuándo los elementos se ven limitados, por ejemplo, en los ácidos la eficiencia de absorción del nitrógeno, calcio, fósforo y magnesio se ve limitada por lo que un mecanismo de adaptación que utilizan es usar las mínimas cantidades del nutrimento disponible



en el suelo así una mayor elongación que aumentaría el espacio-volumen en la exploración (Cruz-Flores, 2006).

La complejidad en la que se desarrollan las plantas (suelo) hace que los criterios de esencialidad se vuelvan más complejos de demostrar debido a que la eliminación de un elemento podría afectar a otro y el uso de un tratamiento químico podría alterar el medio y dejar de ser natural para pasar a un artificial (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).



Diagnóstico del Nitrógeno en la nutrición vegetal

El nitrógeno es considerado uno de los macronutrientes primarios (Sharma & Kumar, 2011), en el Cuadro 5, se presentan los procesos en los que participa. Alcantar & Trejo-Téllez (2009) mencionan que de la biomasa en seco aproximadamente contiene el 1.5% es nitrógeno y que en su mayoría la materia está formada por 45% de carbono y 45% oxígeno, sin embargo, estos contenidos se verán afectados por condiciones específicas de cada especie, por ejemplo, en los granos de soya se reporta 5.8% y el grano de maíz 1.8%.

Cuadro 5. Función del nitrógeno como macronutriente en las plantas superiores. Tomado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009.

ELEMENTO	ESTRUCTURAL	CONSTITUYENTE O ACTIVADOR DE ENZIMA	PROCESO
Nitrógeno	Aminoácidos, proteínas, bases nitrogenadas, ácidos nucleicos, enzimas, coenzimas, vitaminas, glico y lipoproteínas, pigmentos	Constituyente y activador	Absorción iónica, fotosíntesis, respiración, síntesis, multiplicación y diferenciación celular, herencia y metabolismo

Dentro de las plantas mayormente estudiadas se encuentra el maíz (Figura 20) que es una planta sensible a la falta de nitrógeno, en la falta de N las mazorcas son pequeñas con pocos granos y de tamaño pequeño y en las hojas viejas se nota primero la deficiencia de este elemento (Sharma & Kumar, 2011).



Figura 20. Clorosis, Síntoma de deficiencia de nitrógeno en hojas de una planta adulta de maíz donde se nota el color amarillento en forma de V (Tomado de Sharma & Kumar, 2011).

Con el estudio de plantas cultivadas se ha llegado a conocer los límites de nutrimentos, donde se distinguen distintos signos en las plantas. El cuadro 6 muestra los niveles críticos (deficiencia), suficiencia y toxicidad del nitrógeno en vegetales según Correndo & García, 2012 y el cuadro 7 contiene los niveles de suficiencia para diferentes cultivos extensivos.



Cuadro 6. Guía general para el criterio de rango de los niveles críticos (deficiencia), suficiencia y toxicidad de los nutrientes vegetales. Adaptado de Correndo & García, 2012.

NIVELES	NITRÓGENO FOLIAR
	%
Nivel crítico	< 2.0
Suficiencia	2.0 a 5.0
Toxicidad	*No tox.

*No es considerado tóxico (No tox.), cuando se encuentra en exceso, puede causar desbalances y ser perjudicial para el crecimiento, pero rara vez es tóxico.

Cuadro 7. Rangos de suficiencia de nitrógeno en diferentes cultivos. Adaptado de Correndo & García, 2012.

CULTIVO / MOMENTO	TRIGO	CEBADA	ARROZ	MAÍZ	SOJA	***FRIJOL
	Enc-Flo	Esp	Mac-Pan	Flo*	Flo**	HOJA
Porcentaje de nitrógeno						
	1.75-3.3	1.2-1.7	2.6-4.8	2.75-3.25	2.7-4.0	0.26-60
						3.5-5.0

*Hoja opuesta debajo de la espiga

**Hoja de la espiga

Abreviaciones: Enc: encañazón, Flo: floración, Esp: espiga, Mac: macollaje, Pan: panojamiento, Hoja: 1ª hoja madura

*** Osorio, 2012

Uno de los problemas más comunes a los que se enfrenta los cultivos es la deficiencia del N que también puede deberse a diversos factores, como bajo contenido de materia orgánica, suelos de textura arenosa, con riego y uso excesivo en prácticas de agricultura (Sharma & Kumar, 2011), por lo que algunos factores abióticos le van a permitir aumentar o disminuir este potencial (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).

Lo anterior se puede ejemplificar en cultivos muy bien estudiados como el maíz que en suelos sobresaturados se ve limitada la translocación del nitrógeno y del fósforo reduciendo la elongación de las células del tallo que provoca la senescencia del cultivo en etapas juveniles (Cruz-Flores, 2006).

Generalmente para identificar los síntomas visuales del nitrógeno se nota la aparición en las hojas adultas, además cuando el nitrógeno está en baja disponibilidad las plantas detienen su crecimiento y son débiles, por otra parte, las hojas maduras presentan colores amarillentos, necrosis y la calidad se reduce fuertemente (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009).



Diagnóstico del fósforo en la nutrición vegetal

También, el fósforo es considerado un macronutriente primario (Sharma & Kumar, 2011) las funciones dentro de la planta se presentan en el Cuadro 8. Entre los nutrimentos esenciales, el fósforo se encuentra mayormente fijado a complejos orgánicos (Fe-humus, Al-humus, alófano e imogolita) que tienen poca movilidad en el suelo y se ve aún más limitado si el pH es fuertemente ácido (Cruz-Flores, 2006).

Cuadro 8. Funciones del fósforo como macronutriente en las plantas superiores. Tomado de Alcantar & Trejo-Téllez, 2009.

ELEMENTO	ESTRUCTURAL	CONSTITUYENTE O ACTIVADOR ENZIMÁTICO	PROCESO
Fósforo	Ésteres de carbohidratos, fosfolípidos, coenzimas, ácidos nucleicos, nucleótidos.	Cinasas, sintetasa, deshidrogenasas, aldosas, deshidrogenasas.	Propiedades osmóticas, apertura y cierre de estomas, fotosíntesis, transporte de carbohidratos, respiración, síntesis y fijación de N.

En el desarrollo vegetal si se presenta una deficiencia de fósforo repercute en procesos como la inhibición de la síntesis de proteínas además de la acumulación de compuestos nitrogenados (arginina, glutamina, prolina, lisina, asparagina y amonio) y el desequilibrio en la producción entre azúcares y almidón (Fernández, 2007).

Los síntomas fisiológicos de las plantas con deficiencia de P son el achaparramiento, alargamiento de los tallos, madurez tardía y bajo rendimiento de grano y presentan un color característico las hojas maduras que va del verde azulado al rojizo morado (Figura 21).



Figura 21. Hoja de maíz donde se muestra en las hojas el síntoma de deficiencia de P, márgenes rojizos y necrosis al final (Tomado de Sharma y Kumar, 2011).

Una nutrición deficiente de P presenta un “hambre oculta” que puede ser visualizada en el margen de las hojas maduras cuando se presentan en colores morados, rojizos o púrpuras, esto debido a que el P participa en la formación de un azúcar de cinco carbonos que al no estar presente en su formación no se logran formar y los carbonos se dirigen a la formación de antocianinas dando el color característico (Fernández, 2007).



Otro síntoma que muestra la deficiencia del P es el crecimiento lento y el retraso en la maduración que produce plantas enanas, además de retraso en la maduración, mala calidad en los cultivos, enrollamiento en las hojas de cultivos como la papa y raíces susceptibles a las enfermedades (Fernández, 2007).

Cruz-Flores, 2006 menciona que las plantas que sobreviven a la carencia de fósforo utilizan como estrategia: i) la mayor absorción de fósforo fijado a los coloides del suelo, ii) el cambio de pH, lo que pondría en solución algunos compuestos del P, y, iii) la liberación de agentes quelantes (Cruz-Flores, 2006). Además, las plantas pueden utilizar mecanismos externos como el desarrollo de pelos radicales o la habilidad de asociarse con hongos micorrícicos (Roy-Buldoc & Hijri, 2011).



Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl

La Reserva de la Biósfera de los Volcanes (Iztaccíhuatl y Popocatepetl) se encuentra en el centro más poblado del país y se convirtió en la primera área protegida de México en 1935, publicado en el DOF durante el gobierno de Cárdenas, donde se enmarca que la protección de la región de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl así como sus boques, pastos y yerbales que evitan la erosión del suelo y proveen a la población aledaña de recursos hídricos de gran valor (Becerra, 2018; Guerra-Hernández, 2020).

En la actualidad, estos recursos son bienes comunales que, además de proveer de servicios ecosistémicos a la zona centro del país, por la belleza de las montañas en recursos florísticos y faunísticos se aprovecha el potencial turístico que atraen las montañas (Becerra, 2018; Guerra-Hernández, 2020).

Durante el régimen de gobierno de Miguel Alemán y el estallido de la segunda guerra mundial en 1948 se subió la cuota de área protegida de 3000 m s.n.m. a 3600 m s.n.m propiciando la explotación de los recursos de esta área principalmente por la papelera San Rafael hasta el pasado siglo (1992). Lo anterior propició una tala clandestina y excesiva debido a la falta de fuentes de empleo (Becerra, 2018).

Actualmente el parque cuenta con 40 mil hectáreas divididas entre los estados de México, Puebla y Morelos entre las montañas que la forman se encuentran el Tláloc, Iztaccíhuatl y Popocatepetl que desde las culturas prehispánicas hasta la actualidad se celebran ritos a deidades del agua (SEMARNAT, 2016).

Los diversos ecosistemas boscosos del PNI-P incluyen a los ecosistemas ribereños, los cuales son una zona de transición entre el medio terrestre y acuático a lo largo de llanuras de inundación, distinguiéndose por tener gradientes en sus condiciones biofísicas, en estas zonas se llevan a cabo procesos ecológicos que pueden ayudar a mitigar el reciente cambio climático (Dolman, 2019). Las zonas ribereñas cuentan con biota propia de la región que, además su composición está determinada por la intensidad lumínica, la granulometría del suelo y el contenido de agua propios de la región (Naiman *et al.*, 2005; Sandoval, 2020) de gran valor económico y que proveen servicios ecosistémicos a la sociedad.

Las regiones de alta montaña son zonas de mayor riqueza biológica por sus diversos recursos florísticos, faunísticos (Cruz-Flores & Guerra-Hernández, 2017) y edafológicos necesarios para la sociedad humana. Añadido a esto, los ecosistemas ribereños tienden a modificar las



características climatológicas locales aumentando la humedad ambiental y amortiguando las oscilaciones térmicas (Álvarez & Oria, 2004) Además los sistemas ribereños pueden catalogarse como uno de los más diversos y dinámicos en la Tierra por la cercanía a los cursos y cercanía del agua por ello, también considerados como reservorios de una alta diversidad genética (Romero *et al.*, 2014).

Uno de los problemas que se enfrentan las zonas de alta montaña debido a las especies pastizales que son generalmente usadas como forraje para el ganado aledaño es, la compactación del suelo siendo este un gran impacto que reduce la infiltración y degrada los cursos del agua (Romero *et al.*, 2014, Guerra-Hernández, 2020).

Las montañas en particular cuentan con un área fértil limitada que, debido a los usos múltiples que se le dan, es cada vez más la presión sobre estas zonas fértiles. La erosión hídrica, la pérdida de materia orgánica, la retención de nutrientes, la pérdida de la biodiversidad y la contaminación del suelo dan como resultado problemas en los suelos de las montañas, reduciendo su productividad, provisión de buenos servicios y resiliencia. El punto de partida para el desarrollo sustentable es la productividad de la naturaleza, y en cada región o ambiente, se debe tener presente el alcance de sus recursos o la capacidad para absorber los impactos negativos.

En términos financieros, los suelos de las zonas de alta montaña tienen una alta plusvalía ecológica debido a que sus bienes y servicios naturales generalmente están mejor conservados que las zonas bajas ello en gran medida se debe a las geoformas de los ecosistemas ribereños que le confieren la humedad edáfica necesaria para conservar la riqueza de especies que habitan en ellos (Cruz-Flores & Guerra-Hernández, 2017).

Los ambientes ribereños son, generalmente, angostos debido a que se ubican inmediatamente hacia ambos lados de la quebrada y ríos de las zonas altas que incluyen bancos aluviales, humedales o terrazas de inundación por ello, cabe definir a los sistemas ribereños como un sistema terrestre delimitado por su topografía de alta montaña que se interconecta en unidades territoriales funcionales que drenan de manera natural el agua que en ellas hay hacia un mismo destino además de sus abundantes recursos hídricos, estos ecosistemas destacan por su riqueza biológica promoviendo una gran cantidad de productividad primaria (Álvarez, 2004; Cruz-Flores & Guerra-Hernández, 2017). Esta peculiaridad en la disponibilidad hídrica que existe en la zona ribereña permite la presencia de comunidades vegetales denominada edafo higrófilas por su resistencia a las condiciones de humedad de la zona (Álvarez & Oria, 2004).



Además de ser un reservorio de diversidad genética, los sistemas ribereños proporcionan un corredor biológico que ocupa la flora y la fauna para poder desplazarse y minimizar los efectos de aislamiento (Romero *et al*, 2014) incrementando el establecimiento de la vegetación riparia por lo que suelen ser atractivos turísticos dada su belleza escénica (Álvarez & Oria, 2004; Cruz-Flores & Guerra Hernández, 2017).

En otro tenor, la perspectiva de un desarrollo sostenible en países como México queda en una utopía debido a que, en las grandes ciudades, como lo es la ciudad de México, debido a factores como el crecimiento demográfico que en los últimos cien años se ha triplicado (INEGI, 2012) y que los avances tecnológicos no son aplicados desde una perspectiva conservacionista para el desarrollo de la sustentabilidad (Becerra, 1998).

Uno de los recursos naturales importantes en la zona y que debido a su desarrollo a escala no humana se considera como prioritario como sostén de los ecosistemas, el desarrollo sostenible de la agricultura y el soporte de la vida como la conocemos (FAO³, 2022). Los suelos y los demás componentes de los ecosistemas ribereños son un importante sumidero de carbono de gran potencial para mitigar el calentamiento global por lo que la conservación y restauración de los sistemas ribereños promueven el secuestro de este elemento lo que implica muchos beneficios ecológicos y sociales (Sandoval, 2020).

Como los suelos de los sistemas ribereños, aquellos de los paisajes montañosos, tienen el potencial para generar una diversidad vegetal significativa y con ella un sinnúmero de servicios ecosistémicos que el mundo necesita para el soporte de la vida y con ello contribuir en las metas para la sostenibilidad que propone la ONU como la seguridad alimentaria, agua para el consumo humano, adaptación y mitigación al cambio climático, así como el manejo y conservación de los ecosistemas (FAO, 2015).



Justificación de la investigación

Las áreas naturales protegidas (ANP) poseen un papel ecológico, económico y social importante, además de proporcionar de manera local y hasta globalmente servicios ecosistémicos. El ANP, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNI-P) es un reservorio de ecosistemas, siendo un centro de diversificación de muchas especies de importancia ecológica, médica y alimenticia, además de los servicios ecosistémicos que presenta (culturales y de bienes y servicios), por lo que la conservación de estos ecosistemas es de vital importancia.

Entre los ecosistemas que podemos encontrar en el PNI-P está el bosque de *Pinus* sp. (pino), *Pinus* sp.-*Quercus* sp. (pino-encino) y *Abies* sp. (oyamel) y pradera de alta montaña que, además de ser hogar de otras especies vegetales, como el género *Lupinus* que se puede encontrar a partir de los 1300 m s.n.m., teniendo hábitos anuales y perennes.

Lupinus es una leguminosa que forma una fuerte relación con bacterias del género *Bradyrhizobium* para fijar al nitrógeno atmosférico y fijarla y utilizarlo a lo largo de su desarrollo, además entre los metabolitos que sintetiza *Lupinus* se encuentran los alcaloides quinolizidínicos (AQ) como partes de una defensa contra herbívoros. Por su efecto larvicida, fungicida y por la síntesis de esparteína que es usada como catalizador para la síntesis orgánica, a estos alcaloides se les han dado también otros usos, por lo que lo convierte en un metabolito con un uso potencial en diversas áreas, como la farmacéutica, la agrícola y de restauración ecológica. .

Pese a su alto potencial e importancia ecológica, Dolman (2019) considera que se carece de conocimiento del mecanismo existente en *Lupinus* sobre los impulsores precisos de la fijación de nitrógeno y su impacto en las reservas de este macronutriente para los bosques templados. Sumado a lo anterior, debido a que los suelos del PNI-P son de origen volcánico, su acidez limita la cantidad de nitrógeno disponible para que las plantas puedan asimilarlo.

Además, este trabajo responde a las cuatro prioridades para la acción en la conservación del suelo i) estabilizar o reducir el consumo mundial de los fertilizantes nitrogenados ii) minimizar la degradación de los suelos y restaurar la productividad en zonas vulnerables, iii) estabilizar las reservas mundiales de MO en el suelo y por último, iv) mejorar el conocimiento sobre el estado y tendencia de las condiciones del suelo (FAO, 2021).



Objetivos

General

Describir el estado nutricional de nitrógeno en cuatro especies del género *Lupinus* y la relación con el nitrógeno total y algunas propiedades del suelo donde se desarrollan en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona influencia.

Particulares

1. Realizar la caracterización edafo-ecológica de los sitios bajo el género *Lupinus* en la Reserva de la Biósfera de los Volcanes.
2. Realizar un estudio bibliográfico de suelos en sitios estudiados para recopilar y analizar datos de suelos donde se establece *Lupinus*.
3. Evaluar los contenidos de N en tejido foliar (flor, tallo, hojas) de las herbáceas y arbustos acompañantes a los sitios donde crece el género *Lupinus*.
4. Determinar las especies de los individuos de *Lupinus* colectados y resguardarlos en herbario.
5. Evaluar los contenidos de N en tejido foliar (flor, tallo, hojas) del género *Lupinus*, durante la antesis (inicio de floración) y su relación con la calidad del suelo en un gradiente altitudinal del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.
6. Evaluar los efectos de la altitud y el estado de la calidad del suelos sobre las variaciones del contenidos de C, N y P así como los balances C:N y N:P en tejido foliar del género *Lupinus*.



Pregunta de investigación

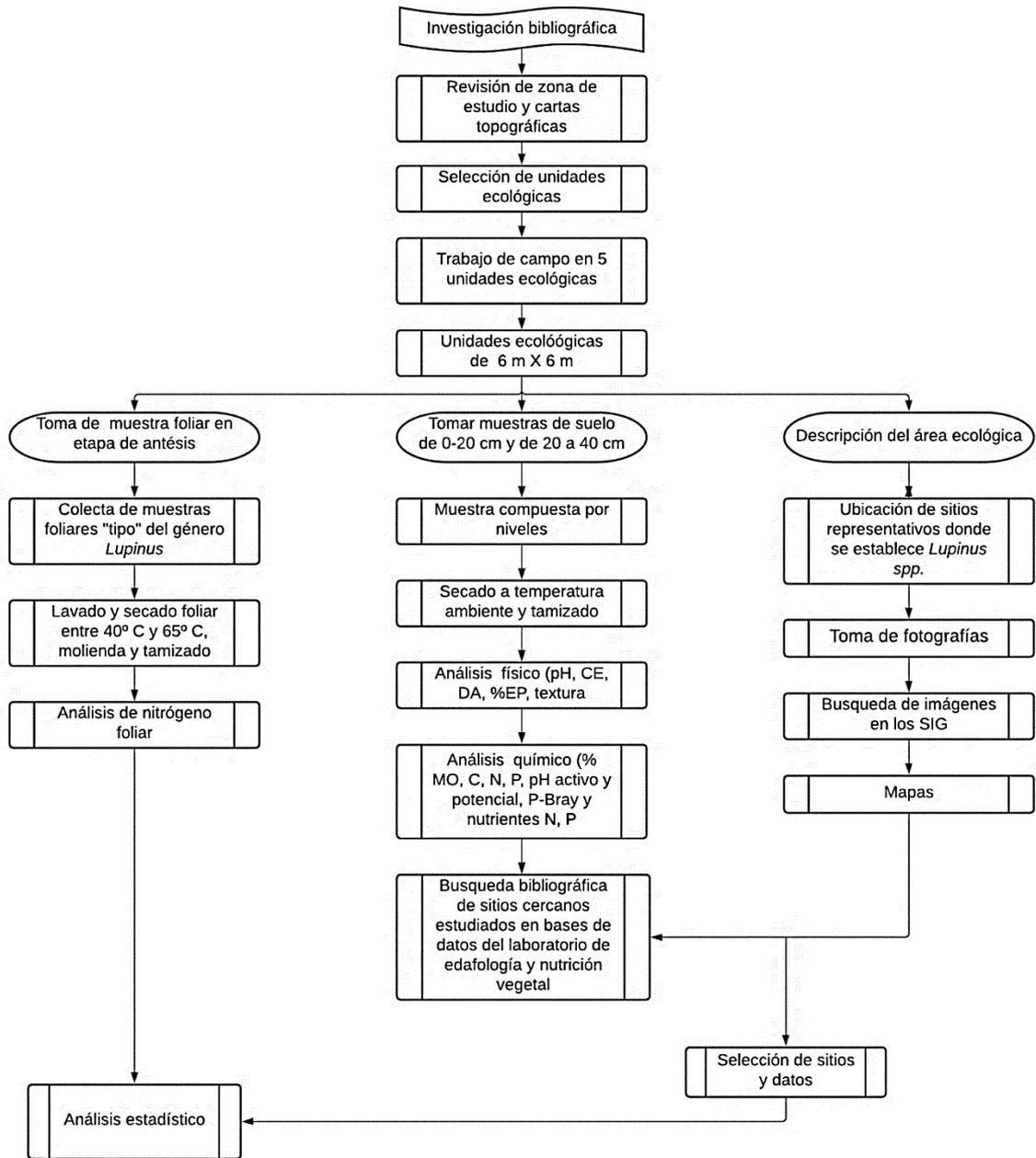
1. ¿Existen diferencias en los niveles de nitrógeno de los suelos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl donde se establece el género *Lupinus* comparado con sitios adyacentes donde no está?
2. ¿Existen diferencias significativas en las propiedades del suelo entre una profundidad de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm?
3. ¿Cuáles son los intervalos de valores en que se encuentran las propiedades de los suelos donde se establece *Lupinus*?
4. ¿Qué especie de *Lupinus* tiene la mejor eficiencia nutricional de nitrógeno durante la antesis?

Hipótesis

1. Por ser leguminosas capaces de realizar simbiosis con bacterias fijadoras de N_2 , el contenido de nitrógeno total en suelos donde se establece el género *Lupinus* es mayor que en los sitios homólogos donde no se encuentran plantas de este género.
2. El mayor contenido de nitrógeno en suelos donde se establece *Lupinus* influye para que el estado del suelo sea diferente en los sitios donde se establece *Lupinus* a los sitios donde no se encuentra.



Diagrama de flujo





Descripción de la zona de estudio

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl está ubicado en una provincia fisiográfica centro oriental de México conocida como Eje Neovolcánico y fue declarado como tal el 8 de noviembre de 1935, por Decreto Presidencial (Figura 22), y por división política su jurisdicción les corresponde a los estados de Morelos, Puebla y Tlaxcala y en su mayor proporción al estado de México.

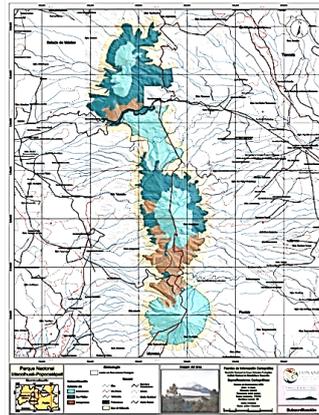


Figura 22. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (CONANP, 2013).

Tiene una superficie de 39 mil 819.086 hectáreas que por diversos intereses políticos y económicos en el gobierno de Miguel Alemán quedó establecido el límite altitudinal del parque entre los 3 mil y 5 mil 480 metros sobre el nivel del mar (CONANP, 2013). El clima de la región va desde templados hasta frío y muy fríos con vientos alisios donde la mayor parte del año se presenta una estabilidad meteorológica debido a que en la zona predominan las circulaciones de tipo conectivo (Domínguez, 2011).

Estos sistemas montañosos forman el parteaguas de dos cuencas hidrológicas, el Alto Balsas que abastece a 6,258,134 habitantes y la cuenca de México a 8,836,144 de habitantes que según Cotler *et al.*, 2010 el grado de alteración es muy alto y extremo lo que altera fuertemente el ciclo hidrológico y afecta el abastecimiento del agua a la población.

La región del parque cuenta con la vegetación alpina más diversa de la zona centro de México, está adaptada a las temperaturas frías por lo que se considera un ecosistema altamente vulnerable al calentamiento global (Werner, 2017) que a lo largo del gradiente montañoso la vegetación se distribuye con bosque de encino hasta los 2800 m s.n.m., bosque de oyamel (*Abies religiosa*) y mixto (*Quercus* spp., *Pinus* spp., *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*) hasta los 3400 m s.n.m., bosque de pino (*Pinus hartwegii*) hasta los 4000 m s.n.m. seguido de zacatonal y vegetación arbustiva hasta los 4400 m s.n.m en andosols y litosols (Rzedowski, 1978)



Materiales y métodos

La investigación se realizó entre agosto 2019 y enero del 2020, se realizaron visitas de campo dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. En cada visita se ubicaron seis sitios con colonias de individuos del género *Lupinus* y se procedió a la colecta de muestras sus estructuras (tallos, hojas y flores).

Los seis sitios de estudio y muestreo (cuadro 13), fueron localizados con ayuda de cartas topográficas y recorridos en campo seleccionando también sitios adyacentes cercanos con las mismas condiciones edafológicas y ecológicas pero sin la colonización de *Lupinus*. En cada uno de los sitios se realizó una descripción ecológica mencionando las características de la colonia avistada¹.

Mediante una investigación bibliográfica de tesis consultadas en TESIUNAM (Cornejo, 2009; Suastegui, 2009; Ayala, 2011; Martínez, 2012; Valderrábano, 2013; Mascot, 2013; Sandoval, 2016; Pérez, 2017; Santiago, 2018; Hernández, 2020; Guerra, 2020; Cruz-Flores *et al.*, 2020) y LENV-8; se completó la selección de sitios considerados en la investigación debido a que se reportaron en dichos trabajos la presencia de individuos del género *Lupinus*.

Una vez obtenida esta información, los puntos de los sitios bibliográficos que se reportaron fueron localizados geográficamente y después georreferenciados con la ayuda del programa Google Earth Pro 7.3.3.7786 y de Qgis 3.18.1-Zürich Pro. Los sitios marcados en los programas fueron discriminados por criterios como la ubicación con respecto a la zona del parque, exposición solar, pendiente, grupos de suelos dominantes, el uso del suelo actual, así como especie avistada. Posteriormente, en el programa se delimitaron grupos formados por los caracteres de inclusión que consideraron el gradiente altitudinal (2890 m a 3890 m) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su zona de influencia (Cuadro 12).

¹ El trabajo de campo fue interrumpido por el confinamiento lo que obligó a ajustar el desarrollo metodológico.

Colecta y manejo del material vegetal

Para el estudio nutrimental se considero lo siguiente: a lo largo de este reporte de investigación habrá de entenderse como “sitios tipo” a aquellos que fueron visitados entre 2019 y 2020, los cuales presentaron colonias de individuos del género *Lupinus* distribuidos entre 2600 m y 4000 m. Una vez seleccionados los sitios tipo con ayuda de QGIS se estimó la superficie que ocupa la colonia de *Lupinus* para diseñar un sistema de muestreo sistematizado en cuadrantes de 6 m × 6 m y en forma de zig-zag (Figura 23).

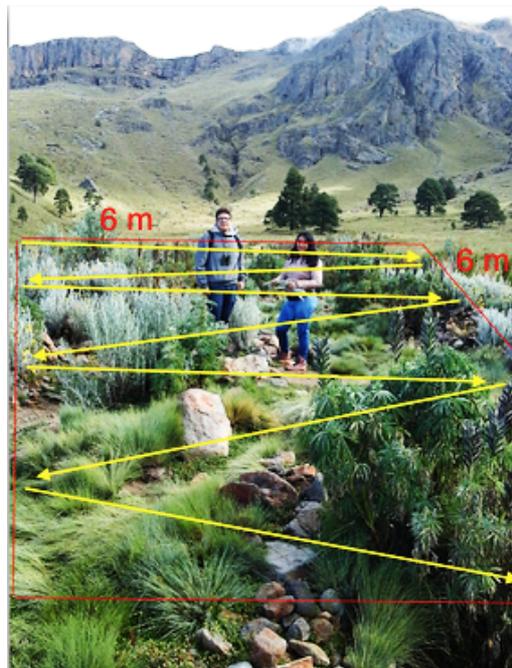


Figura 23. Sitio nombrado “La Joya”. Se muestra el diseño de muestreo para la colecta de ejemplares de *Lupinus*.

Para la colecta de material vegetal se estimó la superficie que ocupa la colonia de *Lupinus* y se trazaron cuadrantes de 3 m × 6 m y se procedió a diseñar un sistema de muestreo al azar. Se procedió a la colecta de tejido vegetal de individuos de *Lupinus* y cuando la biomasa de estos rebasó la cantidad requerida para el análisis químico, se colectó aproximadamente un tercio de ellos eligiendo individuos sanos durante la etapa fenológica de antesis y estas muestras fueron trasladadas en bolsas de papel para su análisis químico.

Para su tratamiento en el laboratorio, se registró el peso en fresco, se lavaron y secaron hasta alcanzar peso constante (peso seco) que también fue registrado. Una vez alcanzado, se procedió a su molienda y tamizado con una malla de #20 y fueron almacenadas para su posterior análisis (Cuadro 13).



Colecta y manejo de muestras de suelo

En cada sitio donde se colectó muestra vegetal, también se tomó muestra de suelo hasta una profundidad de 20 cm. De la misma forma se marcó un sitio alterno, adyacente al primero, con superficie semejante sin la presencia de *Lupinus* y donde se tomó muestra de suelo entre 0 cm a 20 cm y otras más mayores a 20 cm hasta los 40 cm de profundidad. De cada sitio (con y sin *Lupinus*), las muestras compuestas fueron trasladadas en bolsas de hule etiquetadas para su posterior determinación en los análisis de laboratorio correspondientes.

El estudio de las muestras tomadas en campo, se complementó con información obtenida de los sitios seleccionados a través de la búsqueda de datos obtenidos de trabajos, tesis y bases de datos del Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal citados anteriormente. Estos sitios son homólogos en altitud (± 100 m) y están ubicados a una distancia de 300 m a la redonda del sitio muestreado. En todos los casos, se realizó la descripción ambiental y se compararon con los sitios obtenidos de la bibliografía ya referida.

Colecta de ejemplares para determinación de las especies

Se recolectó por triplicado estructuras de inflorescencia material vegetal para su estudio morfológico, donde se seleccionaron 3 individuos en estado fenológico adulto (con inflorescencia). Por cada individuo se tomaron hojas sanas y vigorosas, para estandarizar la muestra y se colocaron en la prensa de manera extendida para su posterior secado durante tres semanas a 40 °C. Esto se realizó en individuos de colonias estudiadas. También se colectaron tres ejemplares de cada población seleccionadas como material de referencia



Análisis de suelo

Para el procesamiento del suelo en el laboratorio, se secó a temperatura ambiente y se tamizó por una malla de 2 mm, se colocó en botes de plástico para conservarlo. Posteriormente se realizó el análisis químico del suelo para obtener los resultados de las variables más representativas, como en Materia Orgánica del Suelo, pH activo, pH potencial, delta pH, Mg intercambiable y Na intercambiable que, según Valderrábano (2013) en un análisis de componentes principales, explican la mayor variabilidad en suelos forestales. Además, se consideró nitrógeno total, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables debido a la naturaleza del trabajo (Cuadro 9).

Cuadro 9. Métodos para determinar parámetros edáficos.

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
pH activo	(Relación suelo agua 1:2) utilizando conductímetro (Richards, 1990)
pH potencial	(Relación CaCl ₂ 1:2) utilizando conductímetro (Richards, 1990)
Conductividad Eléctrica	(Relación 1:5) utilizando el conductímetro
Materia orgánica	Walkey y Black (1934)
Nitrógeno total	Semimicro-kjeldahl para incluir nitratos (Bemmer, 1965)
Fósforo extractable	Método Bray y Kurtz
Capacidad de Intercambio Cationico	Método de versenato (Schollenberger y Simon, 1945)
Cationes intercambiables	Método de acetato de amonio 1N pH 7



Fase de gabinete

El porcentaje de Carbono Orgánico se calculó a partir del porcentaje de Materia Orgánica, suponiendo que esté en un intervalo ideal de 58%:

$$\% CO = \frac{(\% \text{ Materia Orgánica}) \times 58}{100}$$

Se revisaron trabajos, artículos, tesis que contaran con el avistamiento del género *Lupinus* dentro de sus descripciones ecológicas y que además tuvieran datos de suelo, los datos tomados se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Información obtenida de las bases de datos de los trabajos con registro en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
pH activo	(Relación suelo agua 1:2) utilizando conductímetro (Richards, 1990)
pH potencial	(Relación CaCl ₂ ó KCl 1:2) utilizando conductímetro (Richards, 1990)
ΔpH	Diferencia entre pH activo y pH potencial
Conductividad Eléctrica	(Relación 1:5) utilizando el conductímetro
Materia orgánica	Walkey y Black (1934)
Carbono orgánico del Suelo	Ecuación relacionada con el porcentaje de MOS
Nitrógeno total	Semimicro-kjeldahl para incluir nitratos (Bemmer, 1965)
Fósforo extractable	Método Bray y Kurtz
Textura	Bouyoucos (1963)
Densidad real	Del picnómetro (Gavande, 1979)
Densidad aparente	Del cilindro (SAMPLA, 1996)
Humedad del suelo	Por gravimetría



Análisis químico de tejido vegetal

N-total en tejido vegetal por el método micro-Kjeldahl (Bremmer, 1965). Para evaluar la acumulación de N en tejido vegetal, se cuantificó la biomasa de cada compartimento vegetal del que se halla determinado N total y se realizan los cálculos de cantidad de N por unidad de biomasa seca (Cuadro 10).

P-total en tejido vegetal por digestión con $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$, cuantificación por colorimetría. Para la acumulación vegetal de P en tejido vegetal se tomó la biomasa de la flor para su cuantificación (Cuadro 11).

Cuadro 11. Métodos realizados en el análisis foliar.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Nitrógeno total	Semimicro-kjeldahl (Bemmer, 1965)
Fósforo total	Solubilización de P por digestión con $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$

Análisis estadístico

Con la finalidad de conocer la relación que existe entre los parámetros estudiados del suelo con los correspondientes en tejido foliar de *Lupinus* se realizó un análisis estadístico de Pearson, Modelo Lineal Generalizado y ANOVA.



Resultados y discusión

Descripción ecológica de los sitios de estudio

Cascada “La Ranita”. Es el sitio de con mayor altitud estudiado, se encuentra en los 3962 m, entre las coordenadas 537650 m W y 2115807 m N, y se encuentra en el polígono que corresponde al área de conservación del PNI-P, donde el uso de suelo es de conservación (DOF, 2007) con la finalidad de proporcionar los servicios ecosistémicos como la provisión de agua, captura de carbono, regulación del clima, generación de oxígeno, belleza escénica y conservación de las especies (CONANP, 2013).

El lugar tiene un alto grado de conservación y la única perturbación que podría presentar es un sendero cercano. La vegetación predominante es el zacatonal de alta montaña por otro se puede observar rastros de excretas de teporingo, coyotes y ganado por otra parte hay escorrentías de agua donde se reporta la presencia sobre las rocas sumergidas insectos del orden *Trichoptera*.

Su relieve marca un valle en forma cóncava formado por una depresión intermontana que forma un humedal y una corriente de agua permanente que aumenta con las lluvias, mide 1 m de ancho y 6-12 cm de profundidad, corre de norte a sur (Mena, 2018). El sitio marca pendientes entre 2-5 % con un clima Cc (w2) (w) y una temperatura promedio de 8 °C (CONANP, 2013). El suelo es andosol vítrico, con piedra pómez y pH moderadamente ácido con una textura franco-arenosa (Sandoval, 2018), geomorfológicamente es un sitio receptor (Sandoval, 2016) sin capa de mantillo en el lugar donde coloniza *L. montanus*. En las colinas se puede observar *Pinus hartwegii* achaparrado (Mena, 2018) no mayores a 20 m y otras gramíneas amacolladas (Santiago, 2018) en la exposición umbría, mientras que la exposición solana sobresalen sustratos rocosos en las pendientes escarpadas (Otokani, 2020).

En este biotopo junto al río, en el sitio que percibe luz solar la mayor parte de la mañana y la tarde, es donde se encuentra *Lupinus* creciendo junto con otras especies (Cuadro 14). Los individuos de *Lupinus* que se observaron median entre 1.20 m y 1.50 m formando macollos de 5 a 7 tallos. Estos individuos presentan vainas dehiscentes que medían 30-35 cm (Figura 24).



Figura 24. *Lupinus* en el sitio La Ranita.

“La Joya”. Este sitio se ubica a 3890 m, se encuentra en la cercanía del anterior, pero de exposición contraria, entre las coordenadas 536940 m W y 2116534 m N, esta zona pertenece al polígono del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl que corresponde al uso de suelo de conservación (DOF, 2007) con un clima Cc (w2) (w) y una temperatura promedio de 8 °C (CONANP, 2013). Este sitio tiene un alto grado de conservación, aunque se nota la perturbación por presencia de ganado bovino que se alimenta de los zacatonales y bebe agua de los manantiales que se forman en esta microcuenca.

El uso de suelo es forestal y de conservación, cumple con funciones, principalmente la provisión de agua, captura de carbono, regulación del clima, protección de la biodiversidad y el suelo y brinda una belleza escénica a los que visitan estos paisajes (CONANP, 2013; Colli, 2015; Mena, 2018).

Está ubicado en la cabecera de la cuenta entre dos laderas, en la solana puede observarse *Pinus hartwegii* y en la solana zacatonales montanos (Santiago, 2018). El valle que se forma entre las dos laderas y es un sitio receptor con materiales coluviales que son recibidas en una cuenca cóncava y convexa formada de piedra pómez (Sandoval, 2016).

En la zona media del valle se forma una elevación convexa donde se recibe la mayor parte de materiales coluviales que provienen de la cabecera (Figura 25), esta zona tiene una longitud aproximada de 50 a 70 m de largo y de 7 a 25 m de ancho, aquí crece *Lupinus montanus*, esta zona recibe la mayor parte de la mañana y tarde luz solar además de que el sitio donde se establece



la colonia de *L.* no se observó mantillo. *L. montanus* mide entre 60 cm y 80 cm de alto, formada de entre 30 y 37 macollos que al madurar forman vainas dehiscentes de 20-25cm. *Lupinus* se establece junto a otras especies de herbáceas (Cuadro 14) en la parte convexa (11-30 % pendiente) y a su alrededor se establece el zacatonal montano que escasamente se establece entre la parte convexa del Valle.



Figura 25. Paisajes del valle de "La joya" y flor de *Lupinus montanus*.



“Paso de Cortés”. La serranía de Iztaccíhuatl y Popocatepetl se une en un lugar llamado Paso de Cortés esta área es uno de los accesos y el principal punto de encuentro de los turistas en el parque, se encuentra a 3762 m s.m.m. entre las coordenadas 536812 m W y 2111879 m N, es un lugar con perturbación debido a que el sitio de estudio se encuentra a un costado del camino que conecta a la parte más alta del parque.

A lo largo del paso se presentan características como el suelo terracedo, despalme de la vegetación nativa, constante compactación del suelo debido al paso vehicular que conecta a las zonas más altas. Según Valderrábano, 2013 este tipo de suelo es ácido con una temperatura promedio de 13° C y la zona presenta una calidad del suelo muy alta, estimada por sus propiedades químicas, la vegetación predominante en la zona es *Pinus hartwegii* que crecen en suelos ácidos con una pendiente de 20° exposición noreste. Este sitio se encuentra en el polígono de mayor conservación del parque, donde el uso de suelo es de conservación y las actividades permitidas son de recreación, investigación y conservación (CONANP, 2013).

Muy cercano a este sitio, en el rumbo norte, se encontró una colonia de *Lupinus montanus* que crece en las pendientes de entre 15° y 20°, se puede observar rastros de suelo descubierto de la vegetación originaria situadas en terreno terracedo por la apertura de caminos que conectan con diferentes zonas del parque.

En el sitio junto al camino se encontraron otras especies que crecen en conjunto a *Lupinus* (Cuadro 14), *Lupinus* es una planta herbácea, lignificada hasta los 15 cm desde donde inicia el tallo, son individuos en floración que miden entre 160-180 cm y los macollos son de 3 a 8 tallos por individuos (Figura 26).



Figura 26. Flor de *Lupinus montanus* y paisaje de “Paso de Cortés”.

“Cascada Buenavista” El sitio denominado Cascada Buenavista se encuentra a 3637 m s.n.m., entre las coordenadas 539303.2 m W y 2113118 m N. El relieve es ondulado, con muchas pendientes que van desde 8° hasta los 20°, lo que permiten, por la corriente de agua de la montaña, la formación de una cascada. La zona no presenta perturbación a excepción de un camino que sigue la montaña para llegar a las partes más altas.

La vegetación arbórea dominante es *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* seguida de vegetación herbácea representada por matorral alpino. Este sitio se encuentra en el límite de la zona de conservación del parque con un clima Cb (w) kig (CONANP, 2013) a unos pocos metros de una zona ecoturística (zona ecoturística, criaderos equinos, peces, restaurantes).

El terreno presenta inclinaciones pronunciadas, lo que permite la formación de una Cascada por la corriente proveniente la montaña. La zona tiene suelos con textura franco-arenosa de tipo Andosol vítrico úmbrico de pH moderadamente ácido 4.9 (Sandoval, 2016) y temperatura ambiente promedio de 11 °C y 10 °C en el suelo (Santiago, 2018).

En los parajes de estos sitios se encuentra una colonia de *Lupinus aschenbornii*, desde el camino que conecta con el parque ecoturístico hasta la cascada crece a un costado del camino esta especie. En una zona donde la cobertura fue removida (rastros de deslave) y la hojarasca, los matorrales y los grandes pinos dejan descubierto el terreno sin mantillo al claro de luz, crece la colonia de *Lupinus aschenbornii*. Son plantas de 20-30 cm de alto, sin lignificar, compuestas por uno o dos tallos que se encontraron en plena floración (Figura 27).



Figura 27. Flor de *Lupinus aschenbornii* y vegetación de la zona.



“Potrero”. De los sitios investigados en este trabajo el área de mayor influencia antropogénica debido a la agricultura, recreación y asentamientos urbanos se encuentra el sitio nombrado “Potrero” a 2990 m s.n.m en las coordenadas 530530 m W y los 2109428 m N situado en un campo agrícola barbechado con rastrojo entre el que se puede vislumbrar que en un tercio de la parcela se establece *Lupinus* (Figura 28).

Este lugar se encuentra entre los campos de cultivo, el aprovechamiento de especies de pino para las épocas navideñas y los caminos que conectan al pueblo de Amecameca con la reserva del parque, además a los alrededores se desarrollan actividades recreativas, granjas de venados, conejos y truchas.

La vegetación dominante es *Lupinus bilineatus* (Figura 28) y en la periferia se establecen árboles de *Abies* y *Pino* hacia el este y comienza a extenderse conforme descende la altitud el asentamiento denominado Amecameca. *Lupinus* es una planta de aproximadamente 60 cm de alto por 50 cm de diámetro, son plantas amacolladas con 15 a 20 tallos y entre 12 y 15 floraciones por planta, lignificadas en los primeros centímetros del tallo. Se encontró una colonia en floración en una zona agrícola con rastrojo de maíz (Cuadro 14).

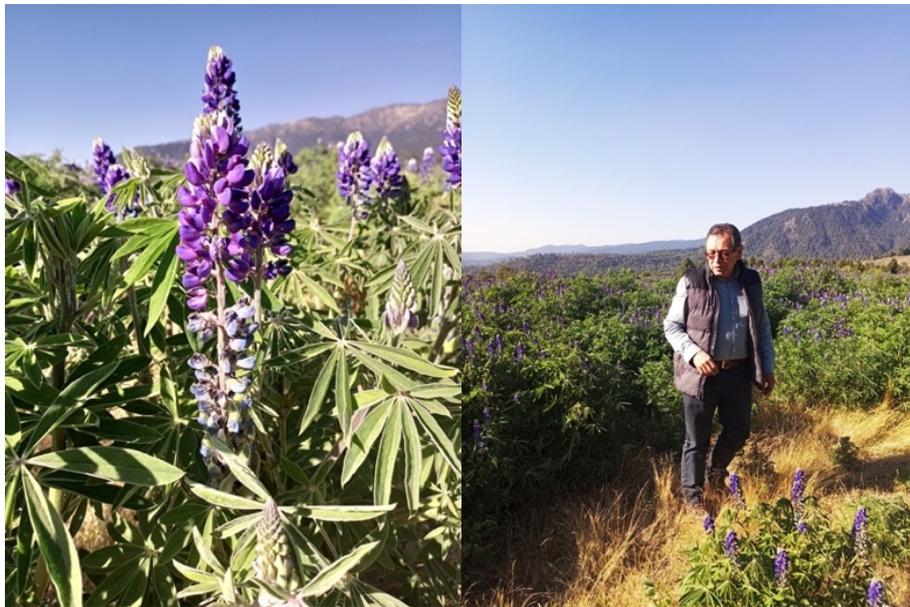


Figura 28. Sitio el potrero donde se encontró el establecimiento de *Lupinus bilineatus* entre el rastrojo de las parcelas.



“**Xalitzintla**”. En la zona limítrofe donde el bosque, los asentamientos urbanos y actividades como la agricultura se conectan, se encuentra el sitio Xalitzintla. Se encuentra a 2980 m s.n.m. entre las coordenadas 546935 m W y 2109694 m N siendo el sitio estudiado de menor altitud. Esta zona, con una pendiente de 4°, se encuentra por un costado del paso de automóviles que conecta a la reserva y 20 m a un costado conecta una barranca producto de la actividad minera que se practica en la zona. También se observó que se practicó desmonte y despalme para cultivar maíz, hacer el camino y al practicar la minería.

El suelo está clasificado como *Fluvisol mólico*, estos suelos se caracterizan por tener un pH ligeramente ácido (6.1), de textura arenosa, con niveles bajos de MOS y altos en conductividad eléctrica a comparación de los otros sitios, aunque en la normatividad estos valores siguen siendo despreciables (Sandoval, 2016; Hernández, 2020). La temperatura ambiente promedio registrado en la zona fue de 20° C, de clima Cb (m) (w) ig (CONANP, 2013).

El estrato herbáceo era dominante en la zona, se notaba relictos de bosque pino-encino, esto también lo describen Hernández, 2020 y Santiago, 2018 que observan como indicadores la presencia de las especies *Alnus* spp. y *Salix* spp., así como especies de importancia económica (*Zea mays*), durazno (*Prunus pérsica*), tejocote (*Crataegus mexicana*) y capulín (*Prunus salicifolia*), corroborando que se realizan actividades agrícolas que se realiza en la zona.

Aquí se encuentra *Lupinus elegans*, una herbácea de 1.5 a 2.5 m de altura, presentan inflorescencias en la parte apical de la planta, hojas palmadas de 2 a 5 cm color verde y en buen estado, de peciolos de 3 a 6 cm. Se encontró una colonia en el claro de sol de una zona perturbada por extracción minera y la agricultura en un talud junto al camino (Figura 30), se encuentra en plena floración junto a otras herbáceas (Cuadro 14).



Figura 29. Camino que conecta al pueblo de Xalitzintla.



Cuadro 12. Sitios de estudio en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl y su zona de influencia.

SITIO TIPO*	ALTITUD	COORDENADAS UTM		EXPOSICIÓN	PENDIENTE	CLASIFICACIÓN DEL SUELO **	USO DE SUELO
		X	_Y_				
	m				grados		
La Ranita	3962	537650	2115807	Noreste	36	Vitrico, húmico	Forestal,
La Joya	3890	536940	2116534	Noroeste	25		Pastizal
Paso de Cortés	3762	536812	2111879	oeste	30	Andosols	-
Cascada Buenavista	3637	539303	2113118	Sur	8-15	Vitrico, húmico	Forestal, Recreativo
Potrero	3000	530530	2109428	Suroeste	11-22	Vitrico	Pesquero
Xalitzintla	2980	546935	2109694	Suroeste	11-20	Fluvisols	Agrícola, Asentamiento



Cuadro 13. Detalle del muestreo para el diagnóstico en tejido vegetal de las especies de *Lupinus* reportadas.

SITIO*	ALTITUD	COORDENADAS UTM NAD 27		ESTADO FENOLÓGICO		TEJIDO VEGETAL					CUADRANTE m ²	
		X	_Y_	A	B	Raíz	Tallo	Hoja	Flor	Vaina		
		_____m_____										1
La Ranita	3962	537650	2115807	X		X	X	X		X		36 (4 obs)
La Joya	3890	536940	2116534	X	X	X	X	X	X		X	36 (4 obs)
Paso de Cortés	3762	536812	2111879	X	X	X	X	X	X		X	36 (4 obs)
Cascada Buenavista	3637	539303	2113118	X		X	X	X	X			36 (2 obs)
Potrero	3000	530530	2109428	X	X	X	X	X	X		X	36 (4 obs)
Xalitzintla	2980	546935	2109694	X	X	X	X	X	X			36 (4 obs)

Estado fenológico: A: Floración. B: Fructificación

Vainas: 1: Sin semilla. 2: Con semilla

X = presencia o ausencia de individuos del género *Lupinus*

A 3,000 m s.n.m., convergen la mayoría de las especies arbóreas en este Parque Nacional creciendo en conjunto con especies herbáceas, como las cuatro especies de *Lupinus* que se determinaron para este trabajo, apareciendo a lo largo del gradiente altitudinal. Los sitios donde se encontró la presencia de colonias de *L. spp* fueron descritos ecológicamente y denominados **sitios tipo**: La Ranita (3962 m s.n.m.), La Joya (3890 m s.n.m.), Paso de Cortés (3762 m s.n.m.), Buenavista (3637 m s.n.m), Potrero (3000 m.s.n.m.) y Xalitzintla (2980 m s.n.m.) como se observa en el cuadro 14.



Cuadro 14. Especies herbáceas determinadas en los sitios tipo y homólogos.

SITIO	ALTITUD	LATITUD X	LONGITUD Y	GÉNERO	ESPECIE	___ ESTABLECIDO ___	
						Tipo	Homólogo
La Ranita	3962	537650	21158.07				
					<i>Lupinus montanus</i>	X	
				<i>Penstemon</i>	<i>gentianoides</i>	X	X
				<i>Eryngium</i>	<i>monocephalum</i>	X	
				<i>Conyza</i>	<i>bonariensis</i>		X
			<i>Festuca</i>	spp	X	X	
La Joya	3890	536940	2116534		<i>Lupinus montanus</i>	X	
				<i>Conyza</i>	<i>bonariensis</i>	X	
				<i>Penstemon</i>	<i>gentianoides</i>	X	
				<i>Festuca</i>	sp	X	X
Paso de Cortés	3762	536812	2111879		<i>Lupinus montanus</i>	X	
				<i>Penstemon</i>	<i>gentianoides</i>	X	
				<i>Conyza</i>	<i>bonariensis</i>		X
Cascada Buenavista	3637	539303	2113118		<i>Lupinus aschenbornii</i>	X	
				<i>Festuca</i>	spp.		X
Potrero	3000	530530	2109428		<i>Lupinus bilineatus</i>	X	
				<i>Zea</i>	<i>mayz</i>		X
Xalitzintla	2980	546935	2109694		<i>Lupinus elegans</i>	X	
				<i>Penstemon</i>	<i>gentianoides</i>	X	
				<i>Bothriochloa</i>	sp	X	
				<i>Salvia</i>	<i>divinorum</i>	X	X
				<i>Pseudognaphalium</i>	<i>chartaceum</i>	X	X

X = presencia o ausencia de individuos del género.



Se encontró la presencia del género *Lupinus* entre 2679 m y 4000 m s.n.m. y por especie se avistó: *L. montanus* (entre 3762 m s.n.m y 3890 m s.n.m.), *L. aschelbornii* (3637 m s.n.m.), *L. bilineatus* (3000 m s.n.m.) y *L. elegans* (2980 m s.n.m) (Figura 30).

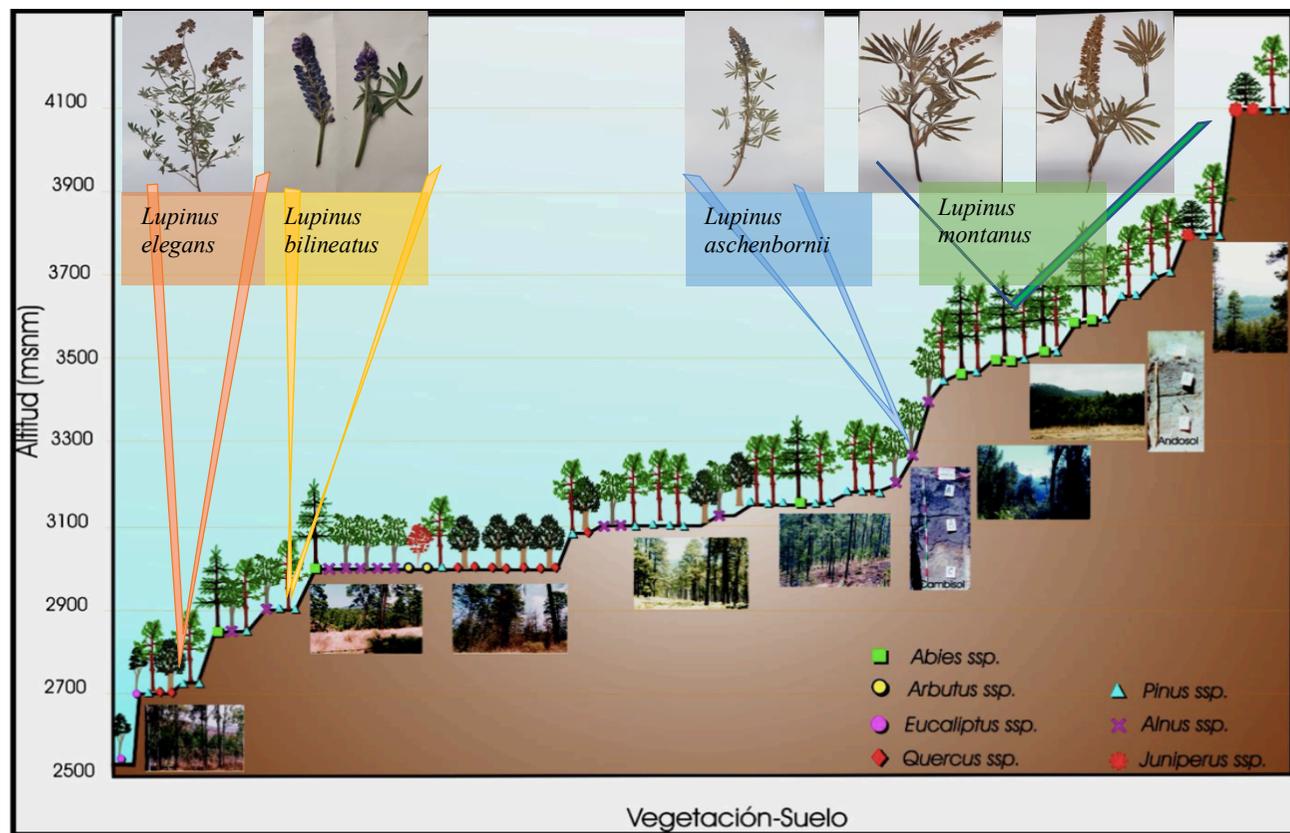


Figura 30. Perfil altitudinal de vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y Anexas. *Pinus sp.* es el género con mayor frecuencia entre los sitios que se establecieron las colonias del género *Lupinus*. Tomado y modificado de Cruz-Flores, 2006.



Estado nutricional del género *Lupinus* y su relación con el suelo

Los suelos de montaña son poco profundos ya que evolucionan lentamente porque las temperaturas bajas hacen que la actividad biológica, la génesis del suelo y la formación sea lenta. Los suelos del PNI-P donde se establecen las colonias de *Lupinus* fueron georreferenciadas (Cuadro 12) y descritas ecológicamente.

Todos los valores de las variables edáficas evaluadas en los sitios donde se estableció y donde no se estableció el género, que pueden influir en el estado nutricional del género se obtuvieron de un análisis por triplicado (Anexo 2).

El pH, como variable maestra, de los suelos donde se establece

El pH, se relaciona con la actividad de otras variables como la actividad microbiana, la absorción de nutrientes y el desarrollo de las plantas. En los sitios donde se desarrolla *Lupinus* se observó que el pH del suelo medido en agua (pH activo) va de fuertemente ácido a moderadamente ácido, siendo el sitio tipo “La Joya” donde se encontraron los más ácidos (4.2 a 4.5), seguido de “Cascada Buenavista” (4.7 a 5.4) y “La Ranita” (5.6 a 5.7), hasta los suelos moderadamente ácidos de “Xalitzintla” (5.7 a 6.1), “Potrero” (5.6 a 6.0) y “Paso de Cortés” (6.0 a 6.5). El comportamiento del pH activo a través del gradiente se ve en aumento como se puede observar en la Figura 32, dicho en otras palabras, el pH es más ácido en las zonas altas y conforme disminuye la altitud el pH del suelo tiende a ser menos ácido.

Los suelos fueron estudiados en dos profundidades: espesor ≤ 20 cm y entre 20 y 40 cm, tanto en los sitios tipo (presencia del género *Lupinus*) como en los suelos de sitios homólogos bajo las especies acompañantes (ausencia del género *Lupinus*). Se tomaron estas profundidades por considerar que el suelo fértil se encuentra en los primeros 20 cm de profundidad (Cruz-Flores, 2006) pero en los sitios “La Ranita” y “Potrero” se tomaron muestras de 0 a 40 cm de profundidad debido a que en “La Ranita” el suelo fue poco profundo y en “Potrero”, el suelo mostró evidencias de ser cultivado.

En los sitios de “La Joya y Xalitzintla”, donde se estableció *Lupinus*., los suelos con espesor ≤ 20 cm presentaron un pH más ácido. Por otro lado, los suelos de “Cascada Buenavista” presentaron el mismo pH en ambas profundidades. En los suelos con ausencia de *Lupinus* pero que presentan las mismas condiciones climáticas, de exposición, altura y origen de suelo, se observó pH más ácido donde está *Lupinus* respecto a los sitios donde es ausente. Esto es más marcado en las

mediciones del pH potencial, variable donde hay mayor acidez en el suelo bajo *Lupinus* en nueve de diez casos observados.

Como se muestra en la figura 31 y como en el caso del pH potencial, el Δ pH que indica la saturación del complejo de cambio que existe en los suelos es menor en los suelos con presencia de *Lupinus* porque se encuentra menos saturado en sales respecto a los sitios donde no está *Lupinus* (Soriano, 2018).

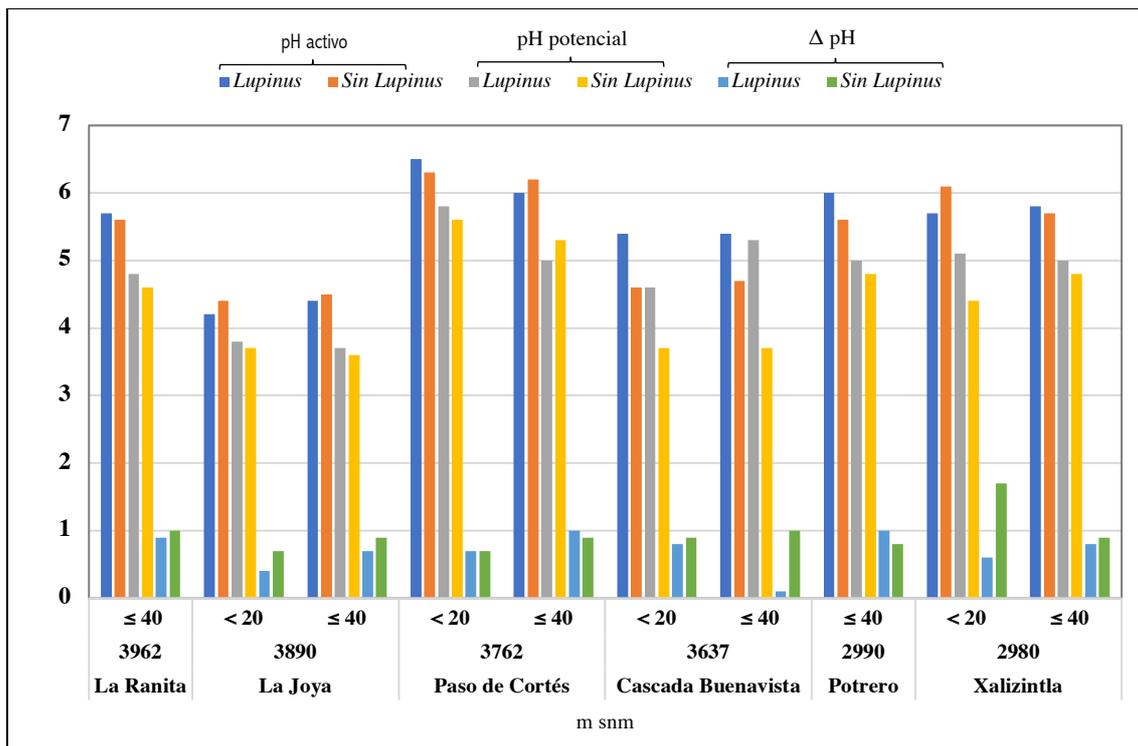


Figura 31. Comportamiento de las mediciones de pH en agua (activo), en CaCl_2 y la diferencia entre ellos (Δ pH), ordenados de mayor a menor altitud.

La conductividad eléctrica de los suelos expresada en deci-siemens por metro (dS m^{-1}) a 25°C tiende a tener efectos despreciables de la salinidad en todos los sitios a todas las profundidades, sin embargo, para los sitios “La Ranita”, “La Joya” y “Paso de Cortés” la salinidad en los sitios donde se estableció *Lupinus* es mayor que donde no, aunque para “Potrero” se presentó en menor cantidad donde se estableció *Lupinus* comparado al sitio donde no se estableció., para “Xalitzintla” se presentó la misma conductividad en los suelos superficiales. Al igual que el pH, la conductividad eléctrica aumenta conforme la altitud disminuye (Cuadro 15).



Cuadro 15. pH y Conductividad eléctrica de los sitios tipo y sus homólogos en el suelo donde se avistó el género *Lupinus*.

SITIO	ALTITUD m	PROFUNDIDAD cm	pH 1:2				Δ pH		CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	
			activo		potencial		dS m ⁻¹			
			<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>
La Ranita	3962	≤ 40	5.7	5.6	4.8	4.6	0.9	1	0.07	0.06
La Joya	3890	< 20	4.2	4.4	3.8	3.7	0.4	0.7	0.05	0.04
		≤ 40	4.4	4.5	3.7	3.6	0.7	0.9	0.06	0.05
Paso de Cortés	3762	< 20	6.5	6.3	5.8	5.6	0.7	0.7	0.16	0.08
		≤ 40	6	6.2	5	5.3	1	0.9	0.1	0.1
Cascada Buenavista	3637	< 20	5.4	4.6	4.6	3.7	0.8	0.9	0.08	0.04
		≤ 40	5.4	4.7	5.3	3.7	0.1	1	0.1	0.24
Potrero	2990	≤ 40	6	5.6	5	4.8	1	0.8	0.07	0.08
Xalitzintla	2980	< 20	5.7	6.1	5.1	4.4	0.6	1.7	0.1	0.1
		≤ 40	5.8	5.7	5	4.8	0.8	0.9	0.07	0.12



Materia y carbono orgánicos, nitrógeno total y fósforo disponible del suelo donde se establece *Lupinus*

La MOS donde se aloja más de 45 % del carbono orgánico del suelo, buena parte del Nitrógeno total y de fósforo disponible, es fundamental para estabilizar la estructura de los suelos y la retención y liberación de los nutrientes, así como para aumentar la capacidad de retener agua, lo que la convierte en un indicador de fertilidad y de resiliencia (FAO, 2017). En primera instancia, se observó que en todos los sitios donde se estableció *Lupinus* no se encontró mantillo. Los resultados de los contenidos de MOS, COS, N-t y P-d de los suelos donde se avistó el género *Lupinus* se reportan en los cuadros 16.

En los sitios “La Ranita, La Joya y Cascada Buenavista y Xalitzintla”, los contenidos de materia orgánica del suelo fueron mayores en suelos bajo *Lupinus*, comparados con los suelos homólogos (donde no se encontró *Lupinus*). Entre los sitios homólogos, el sitio “Cascada Buenavista” fue el lugar donde se encontró la mayor cantidad de MOS (Figura 32). A pesar de las diferencias señaladas estos resultados no muestran diferencias estadísticas significativas (Cuadro del Anexo 3).

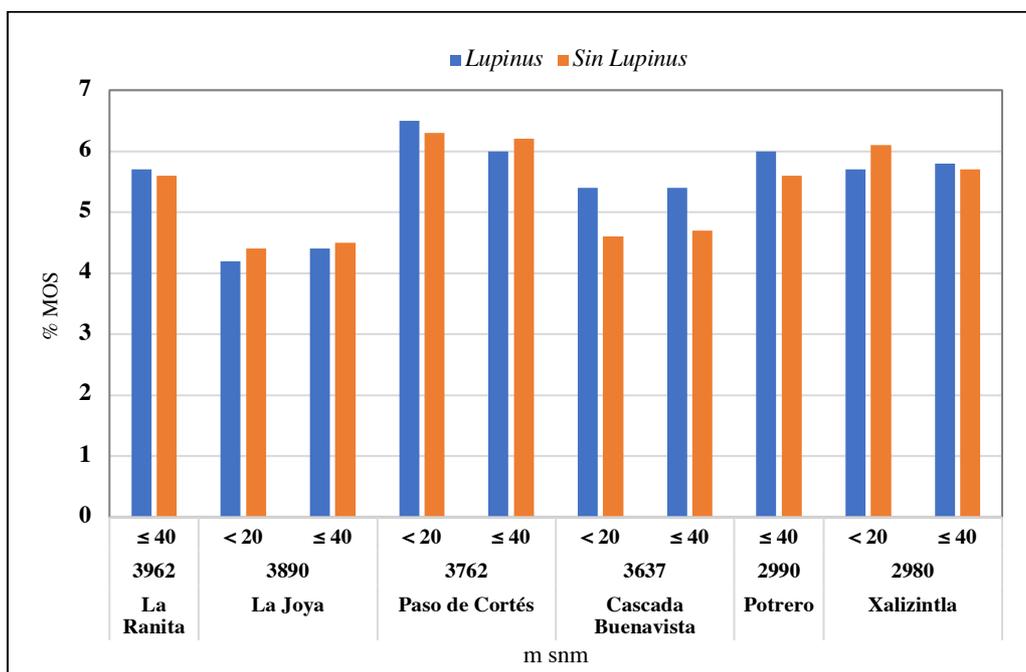


Figura 32. Porcentaje de MOS, a diferentes profundidades, en los suelos donde se establece *Lupinus* comparado con los sitios homólogos donde no se establece este género.

El suelo es un importante cuerpo captador de carbono, la materia orgánica del suelo comprende aproximadamente 55-60 por ciento de C y en muchos suelos forma parte de las reservas de C



(FAO, 2017). Para fines de esta investigación, se utilizó el factor de conversión del 56% de la relación Materia Orgánica del Suelo: Carbono Orgánico del Suelo, por lo que su relación es alta. Para la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, los contenidos de MOS de los suelos volcánicos donde se establece el género *Lupinus* en el sitio “La Joya” se clasificaron como de clase muy baja y, para los otros sitios (La Ranita, Paso de Cortés, Cascada Buenavista, Potrero y Xalizintla”) son de clase baja ($p \leq 0.05$) (Cuadro del Anexo 3).

El nitrógeno es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas al formar parte de aminoácidos, proteínas y ser un componente básico en el ADN (Cruz-Flores, 2006; Alcántar & Trejo-Téllez, 2009, CYMMIT, 2020). Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, los contenidos de Nitrógeno-total, que se muestran en el cuadro 16, de todos los suelos volcánicos estudiados se clasifican dentro de la clase baja excepto los suelos de “Paso de Cortés y Cascada Buenavista” cuyos contenidos de N-total de los sitios donde no se establece *Lupinus* son calificados como de clase media y alta respectivamente ($p \leq 0.05$).

Como se muestra en el gráfico de la figura 33 el nitrógeno total de los suelos donde se estableció *Lupinus* tuvo porcentaje menor en siete de diez pares de valores respecto a los que no tienen *Lupinus*. La mayor diferencia se observó en “Cascada Buenavista donde se estableció *Lupinus aschenbornii*” con una diferencia aproximadamente tres veces mayor donde no se estableció esta especie. En general, se encontró mayor cantidad de nitrógeno en los sitios homólogos que los sitios tipo ($p \leq 0.05$).

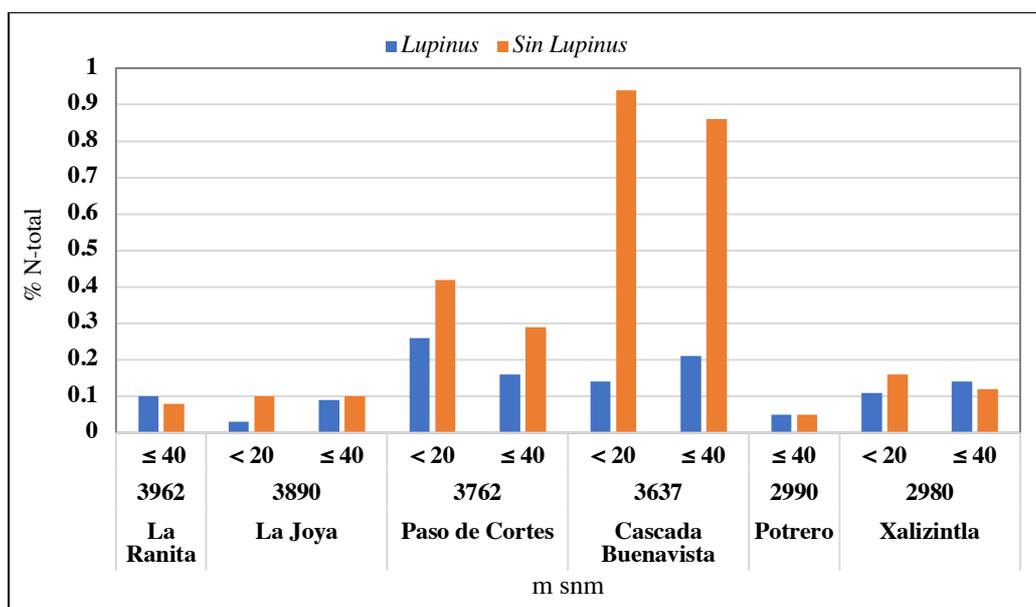


Figura 33. Comportamiento del Nitrógeno-total de los suelos donde se estableció *Lupinus* y donde no se estableció.

Por otro lado, la cantidad de fósforo en el suelo es una variable que es influenciada por la dinámica de las propiedades del suelo que a su vez interactúan con las plantas y las condiciones ambientales, por lo que su abastecimiento influye de manera importante en la morfología de los individuos como en el caso de *Lupinus albus* en donde se ha reportado que incrementa el número de raíces proteoides como estrategia en la búsqueda de alimento (Cruz-Flores, 2006).

El gráfico de la figura 34 muestra los valores de P-disponible del suelo de los sitios donde se establecieron colonias de *Lupinus*, así como en los sitios alternos. Los resultados mostraron que, de diez pares de valores calculados en los suelos superficiales, siete de ellos mostraron que la cantidad de fósforo es mayor en presencia de *Lupinus*. Por el contrario, seis de diez pares de valores estudiados de suelos profundos en los sitios donde no se establecieron colonias de este género, mostraron una mayor cantidad de fósforo (Cuadro 16).

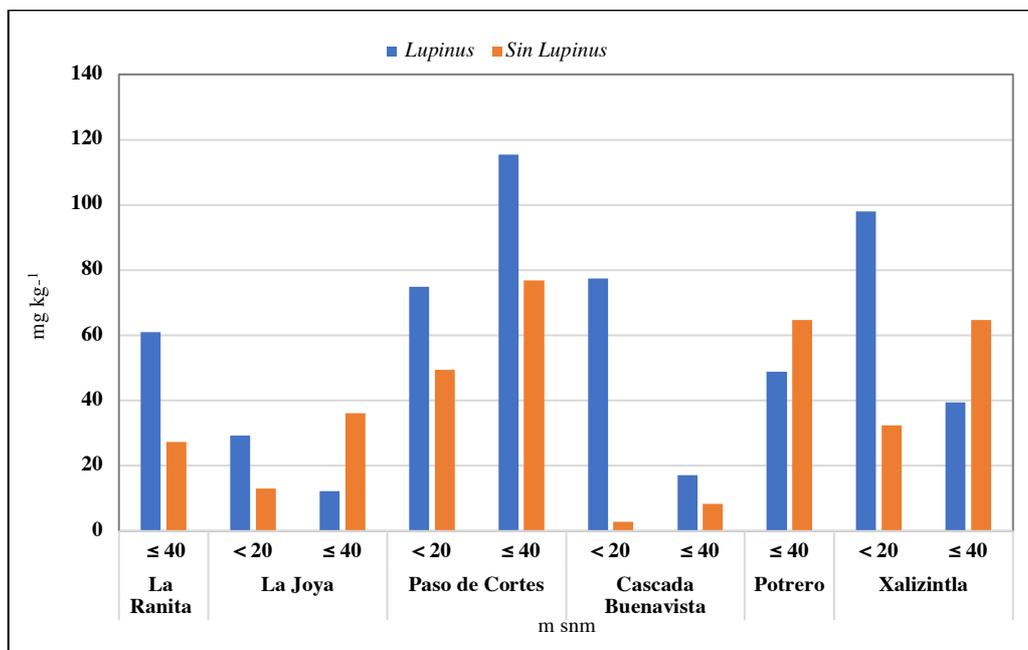


Figura 34. Comportamiento del fósforo disponible en los suelos tipo (donde se estableció *Lupinus*) y los suelos homólogos (donde no se estableció *Lupinus*).

En general, los suelos donde crece *Lupinus* mostraron una mayor cantidad de fósforo disponible que cuando no está, por lo que, la tendencia indica una probable contribución de *Lupinus* a incrementar los niveles de P-disponible en los suelos ($p \leq 0.05$).



Cuadro 16. Contenido del porcentaje de Carbono y Nitrógeno así como del Fósforo disponible en el suelo donde se estableció *Lupinus* y los sitios homólogos.

SITIO	ALTITUD m	CONDICIÓN cm	_ MATERIA ORGÁNICA _		_ CARBONO ORGÁNICO _		_ NITRÓGENO TOTAL _		_ FÓSFORO DISPONIBLE _	
			<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus</i>	Sin <i>Lupinus</i>
La Ranita	3962	≤ 40	5.7	5.6	4.8	4.6	0.1	0.08	60.9	27.3
La Joya	3890	< 20	4.2	4.4	3.8	3.7	0.03	0.1	29.3	13.1
		≤ 40	4.4	4.5	3.7	3.6	0.09	0.1	12.3	36.1
Paso de Cortés	3762	< 20	6.5	6.3	5.8	5.6	0.26	0.42	74.9	49.5
		≤ 40	6	6.2	5	5.3	0.16	0.29	115.4	76.9
Cascada Buenavista	3637	< 20	5.4	4.6	5.6	3.7	0.14	0.94	77.4	2.91
		≤ 40	5.4	4.7	5.3	3.7	0.21	0.86	17.1	8.4
Potrero	2990	≤ 40	6	5.6	5	4.8	0.05	0.05	48.9	64.8
Xalitzintla	2980	< 20	5.7	6.1	5.1	4.4	0.11	0.16	97.9	32.4
		≤ 40	5.8	5.7	5	4.8	0.14	0.12	39.4	64.8



Cationes intercambiables en los suelos donde se estableció *Lupinus*

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo determina el potencial para retener iones y que estos no se pierden por lavado y así las plantas puedan absorber los nutrientes almacenados. Los cationes más abundantes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Na^+ , K^+ y Al^{3+} (Cruz-Flores, 2006; FAO, 2022).

El cuadro 17 muestra los contenidos de calcio, magnesio y potasio de los suelos en los que se establecen colonias de *Lupinus* y, en casi todos los casos para los tres elementos, los niveles entran en la clase denominada “muy bajo” con excepción del sitio “Paso de Cortés” con “*Lupinus montanus*” que presenta niveles mayores de estos tres cationes y lo ubica en la categoría de bajo (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Cuadro 17. Cationes intercambiables de los suelos donde se avistó el género *Lupinus*.

SITIO	ALTITUD	ESPECIE	CONDICIÓN	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹				CIC
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
	m							
La Ranita	3962	<i>Lupinus montanus</i>		1.1	0.1	0.06	0.04	1.32
La Joya	3890	<i>Lupinus montanus</i>		1.9	0.9	0.2	0.1	3.2
Paso de Cortés	3762	<i>Lupinus montanus</i>	≤ 20 cm	3.2	1.1	0.2	0.04	4.6
Cascada Buenavista	3637	<i>Lupinus aschenbornii</i>		0.6	0.07	0.05	0.04	0.7
Potrero	2990	<i>Lupinus bilineatus</i>		1.8	0.4	0.3	0.01	2.4
Xalitzintla	2980	<i>Lupinus elegans</i>		1.4	0.1	0.08	0.02	1.6

Como se muestra en la figura 35, los mayores contenidos de cationes intercambiables se presentaron donde se estableció *Lupinus montanus* (parte alta del gradiente) seguido por los suelos donde se observaron a *Lupinus bilineatus*, *Lupinus elegans* y finalmente, donde se presentaron los menores contenidos de esos cationes fue en los sitios bajo *Lupinus aschenbornii* ($p \leq 0.05$).

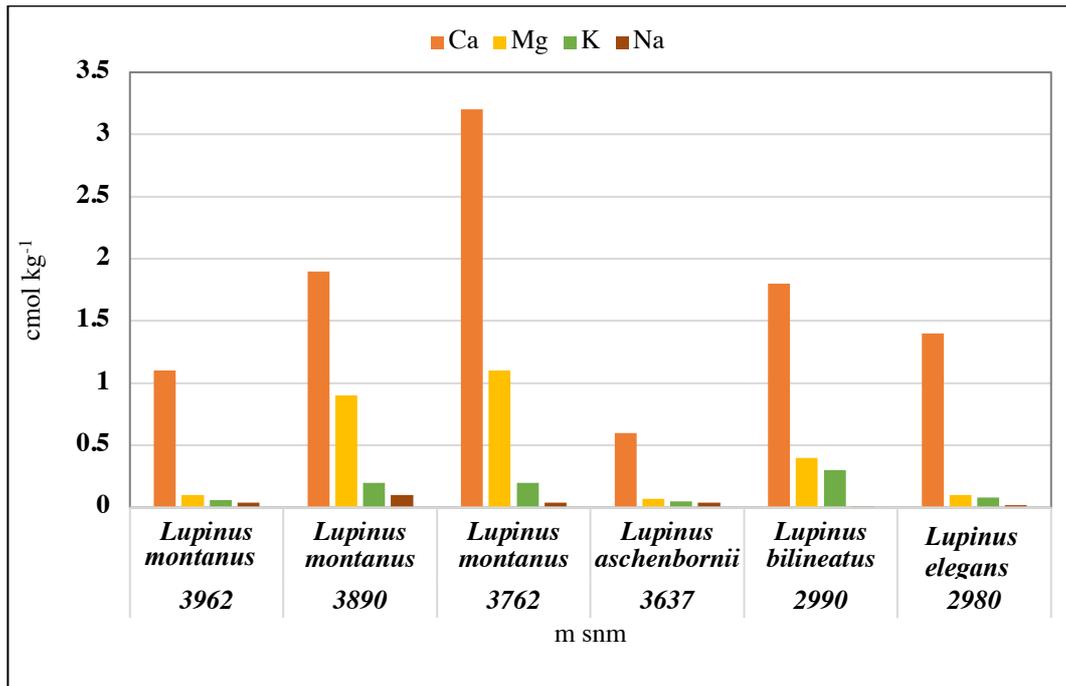


Figura 35. Cationes intercambiables para los sitios donde se avistó *Lupinus*.

La CIC, según lo reportado por Cruz-Flores (2006) reside en los coloides que predominan en todos los sitios siendo los sesquióxidos (Cuadro 17). En el sitio “Paso de Cortés”, el suelo tuvo mayor valor de CIC, seguido de los suelos de “La Joya, Potrero, Xalitzintla, La Ranita y Cascada Buenavista” (Figura 36). En todos los casos, la Capacidad de Intercambio Catiónico es típica de suelos arenosos, con poca capacidad de retener cationes debido a que la mayor fracción de suelo es arena y los cationes tienden a la lixiviación con mayor facilidad (FAO, 2022).

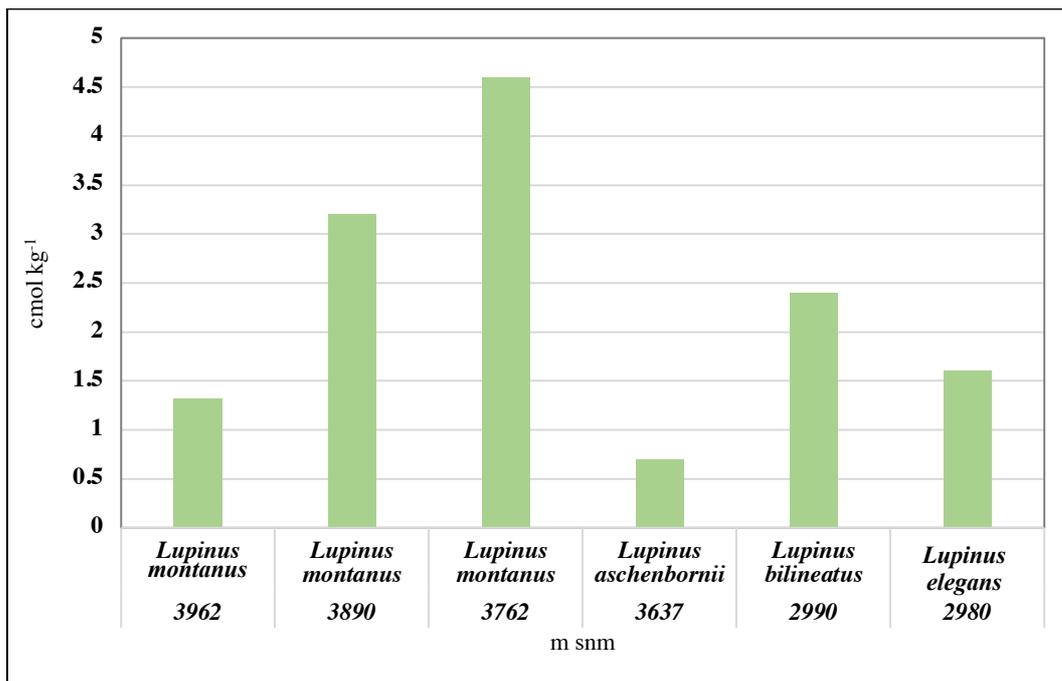


Figura 36. Capacidad de intercambio catiónico para los sitios donde se estableció *Lupinus*.



Como se observó en la figura 35 los suelos donde se estableció *Lupinus* tienen contenidos mayores de calcio, magnesio y potasio y una menor porción de sodio. Un factor importante es cómo se comportan entre ellos, siendo las relaciones entre los cationes un índice de la fertilidad del suelo. De los valores de CIC que se presentaron en el cuadro 17 el calcio es el catión dominante, aunque se encuentra en límites muy bajos lo que determina balances con magnesio, potasio y sodio valores de 4 y hasta 40.

Particularmente el cuadro 18 presenta los balances Ca/K, Mg/K, Ca/Mg y (Ca + Mg) /K de los suelos donde se desarrolla cada especie de *Lupinus*, del que puede deducirse cuales son los balances desfavorables de cationes como en el caso de *Lupinus bilineatus* (Figura 37).

Tener presente que los balances de cationes que se presentan en el cuadro 18 provienen de investigaciones en suelos dedicados a la agricultura (Centeno, s.f.) y en el caso de esta investigación las especies del género *Lupinus* han desarrollado estrategias para desarrollarse con éxito en estos suelos forestales.

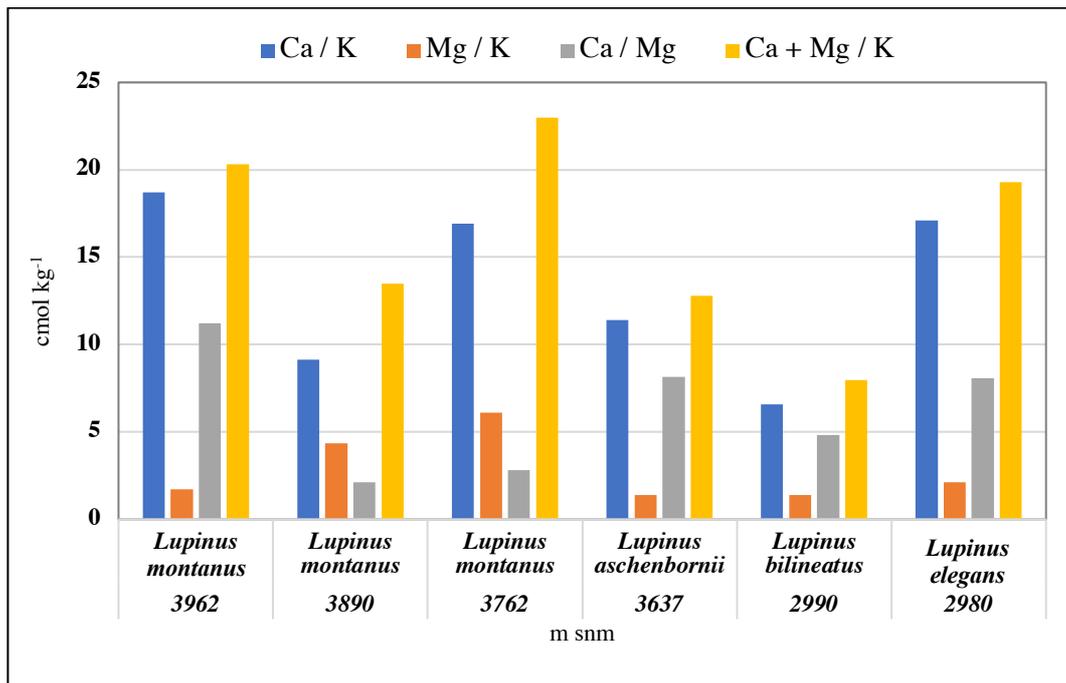


Figura 37. Patrones de las relaciones entre los cationes intercambiables de los suelos superficiales donde se estableció *Lupinus*.



Cuadro 18. Relación entre cationes intercambiables de los suelos superficiales donde se estableció el género *Lupinus*.

*SITIO	ESPECIE	ALTITUD	Ca ²⁺ /K ⁺	Mg ²⁺ /K ⁺	(Ca ²⁺ + Mg ²⁺)/K ⁺	Ca ²⁺ /Mg ²⁺
		m	cmol kg ⁻¹			
La Ranita	<i>Lupinus montanus</i>	3962	18.7	1.7	20.3	11.2
La Joya	<i>Lupinus montanus</i>	3890	alto	bajo	mediano	muy alto
			bajo	muy alto	bajo	mediano
Paso de Cortés	<i>Lupinus montanus</i>	3762	16.9	6.1	23	2.8
			alto	muy alto	mediano	mediano
Cascada Buenavista	<i>Lupinus aschenbornii</i>	3637	11.4	1.4	12.8	8.14
			mediano	bajo	bajo	muy alto
Potrero	<i>Lupinus bilineatus</i>	2990	6.59	1.37	7.96	4.81
			bajo	bajo	muy bajo	mediano
Xalitzintla	<i>Lupinus elegans</i>	2980	17.1	2.1	19.3	8.06
			alto	mediano	bajo	muy alto

*Resultados de la muestra compuesta de suelo a una profundidad de ≤ 20 cm.

Los valores de las propiedades químicas del suelo de esta investigación coinciden con lo reportado por Barrientos *et al.*, (2002), quienes cultivaron *Lupinus albus* y *Lupinus angustifolius* con un buen desarrollo y tienen la capacidad de fijar altas cantidades de nitrógeno atmosférico en un Andisol chileno. Sus resultados describen un pH moderadamente ácido (6.1), alto porcentaje de materia orgánica (15 %), bajo contenido de nitrógeno inorgánico disponible (20 mg kg⁻¹), altos contenidos de P-Olsen (25 mg kg⁻¹) y, en cuanto a los cationes intercambiables, Ca se encuentra en mayor porción (8.14 cmol kg⁻¹) seguido de Mg (1.22 cmol kg⁻¹), Na (0.28 cmol kg⁻¹) y K (0.21 cmol kg⁻¹).

El desarrollo vegetal es un indicador biológico que puede sintetizar las condiciones ambientales en las que las plantas se desarrollan como las del **género *Lupinus*, y especies acompañantes**, describiendo su desarrollo a lo largo del gradiente altitudinal del PNI-P. La mayor parte del material vegetal de las plantas superiores es agua, los valores oscilan entre 80% y 90% y se encontrarán dependiendo de la actividad metabólica que realiza cada órgano vegetal y de la etapa fenológica de los individuos (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009). Una vez colectados los ejemplares de *Lupinus*, se registró el peso fresco y seco datos que se muestran en el cuadro 19, la partición de biomasa se presenta gráficamente en la figura 38 y 39 y los estadísticos en el cuadro del anexo 3.

La figura 38 muestra el grafico de porcentaje de partición de masa vegetal en las especies de *Lupinus* donde se observa que el promedio de agua que almacenaron las especies de *Lupinus* fue de 60%, con una desviación de 15.4, la especie de mayor acumulación de agua fue *L. aschenbornii*, seguida de *L. bilineatus*, *L. montanus* y *L. elegans* ($p \leq 0.05$). *Lupinus montanus* presentó una variación en partición de biomasa que la acumula más en hoja que se debe seguramente a que inicia la maduración de vaina y semilla en el sitio más elevado.

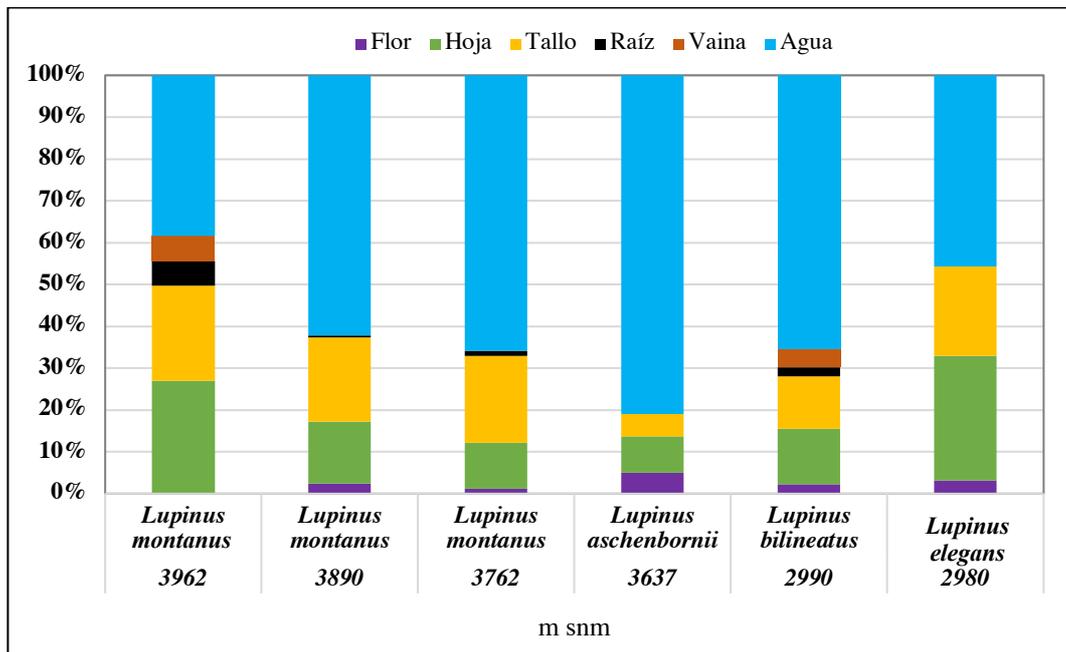


Figura 38. Partición de masa vegetal fresca para el género *Lupinus*.

El porcentaje de peso seco de cada una de las estructuras del género *Lupinus* puede apreciarse en la figura 39. Para todas las especies el tejido de menor proporción fue la vaina, seguido de la raíz y flores y en mayor cantidad se encontró el peso de las hojas seguido del de los tallos ($p \leq 0.05$). En general, la especies de *Lupinus montanus* de la región más alta fueron los individuos con mayor peso por estructura de materia seca ($p \leq 0.05$).

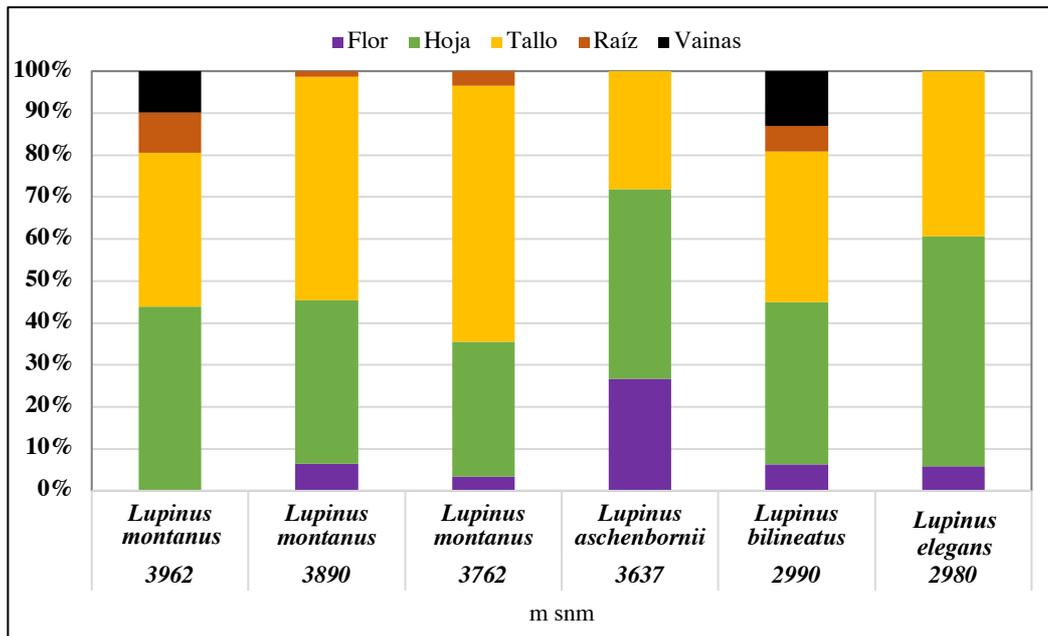


Figura 39. Partición de masa peso seco de los órganos vegetales en *Lupinus*.

Según lo reportado por Zamora *et al.* (2019) de su experimento con tres especies; *Lupinus exaltatus*, *Lupinus rotundiflorus* y *Lupinus mexicanus*, la cantidad total de materia seca a los 122 días de crecimiento fue de 68.9 g, 23.37 g y 49.4 g, respectivamente lo que representa en promedio una masa equivalente a la producida por las especies silvestres *Lupinus bilienatus* y *Lupinus elegans* estudiadas en este trabajo.

Lupinus es una leguminosa que a lo largo del gradiente altitudinal se establece junto con otras especies que, para fines de este estudio, se nombraron **especies acompañantes**. Estas se presentan en el cuadro 19 así como la partición de biomasa de las estructuras encontradas, (flor, tallo, hoja, raíz, vainas y agua) para todas las especies.

A lo largo de este gradiente se encontraron ocho especies acompañantes a las colonias de *Lupinus*. La especie con menor porcentaje de agua fue el pasto alpino (*Festuca*) que se encontró desde 3962 hasta 3637 m y las de mayor porcentaje de agua fueron las especies de *Lupinus montanus*, *Lupinus aschenbornii* y *Zea mayz* ($p \leq 0.05$). En general, los porcentajes de agua para las especies van de 25 al 80 % ($p \leq 0.05$).



Cuadro 19. Partición de biomasa en especies de crecen en comunidad con *Lupinus*.

LOCALIDAD	ALTITUD	ESTABLECIMIENTO		ESPECIE	MASA TOTAL						
		Tipo	Homólogo		g						
					Flor	Hoja	Vainas	Tallo	Raíz	Agua	Total
La Ranita	3962	X		<i>Lupinus montanus</i>	.	23.4	5.3	19.6	5.1	33.2	86.6
		X	X	<i>Penstemon gentianoides</i>	5.2	9.4	.	10.3	.	19.6	44.5
		X	X	<i>Festuca</i>	.	30.6	.	.	80.9	70	181.5
		X		<i>Eryngium monocephalum</i>	18.8	19.1	.	18.9	.	49.9	106.7
			X	<i>Conyza bonariensis</i>	5.1	8.1	.	6.5	.	13.8	33.5
La Joya	3890	X		<i>Lupinus montanus</i>	58.6	352.3	.	481	12	1483	2386.9
		X	X	<i>Festuca</i>	.	30.6	.	.	80.9	70	181.5
		X		<i>Conyza bonariensis</i>	178.4	327.8	.	1111.7	.	2180	3797.9
		X		<i>Eryngium monocephalum</i>	18.8	19.1	.	18.9	.	49.9	106.7
		X		<i>Penstemon gentianoides</i>	20.6	28.7	.	30.6	.	43.7	123.6
Paso de Cortés	3762	X		<i>Lupinus montanus</i>	5.7	53.1	.	100.9	5.7	319.2	484.6
		X		<i>Penstemon gentianoides</i>	10.9	12.5	.	15.4	.	32.9	71.7
			X	<i>Conyza bonariensis</i>	5.1	8.1	.	6.5	.	13.8	33.5
Cascada Buenavista	3637	X		<i>Lupinus aschenbornii</i>	1.3	2.3	.	1.4	.	21.5	26.5
			X	<i>Festuca</i>	.	30.6	.	.	80.9	38.6	150.1
Potrero	2990	X		<i>Lupinus bilineatus</i>	4.05	24.75	4	22.5	8.5	123.6	187.4
			X	<i>Zea mayz*</i>	28.2	69.4	97.6
Xalitzintla	2980	X		<i>Lupinus elegans</i>	2.1	19.9	.	14.3	.	30.6	66.9
		X	X	<i>Penstemon gentianoides</i>	5.2	9.4	.	10.3	.	35.5	60.4
		X	X	<i>Salvia divinorum</i>	2.4	8.7	.	14.1	6.3	49.6	81.1
		X	X	<i>Pseudognaphalium chartaceum</i>	1.3	11.7	.	34.8	34.8	36.6	119.2
		X		<i>Bothriochloa</i>	5.1	119.6	.	.	216.1	234.7	575.5

* El dato de *Zea mayz* usado en "Potrero" se obtuvo de la USDA, para la variedad de maíz blanco dulce.



La especie acompañante de mayor presencia en la zona alta fue *Conyza bonariensis* presente desde 3962 m hasta 3762 m, esta especie es reconocida por sus efectos cicatrizantes en la medicina ancestral (CONABIO, 2009). Según los resultados obtenidos, *Conyza* tiene mayor productividad de biomasa cuando se establece junto a *Lupinus* que cuando está sola como se observa en “La Joya”, ($p \leq 0.05$).

Una especie conocida por adornar los volcanes es *Festuca* que se establece entre 3962 m y 3637 m en 3 sitios (“La Ranita, La Joya y Cascada Buenavista”), otra especie emblemática del parque es *Eryngium monocephalum* (rosa de los volcanes) que se distribuye en la zona más alta y de mayor conservación en “La Ranita y La Joya”, esta creció junto a *Lupinus*.

Penstemon gentianoides, conocida como campanita, es una especie que establecida en la mayoría de los sitios junto a *Lupinus* (“La Ranita, La Joya, Paso de Cortés y Xalitzintla”) presentó de dos a tres veces más materia seca en “La Joya” comparada con las otras localidades ($p \leq 0.05$). Esta especie es usada en México por sus propiedades antioxidantes (Domínguez *et al.*, 2005).

Otras plantas acompañantes de *Lupinus* fueron *Salvia divinorum* (salvia) conocida por sus propiedades alucinógenas (Díaz, 2014), *Pseudognaphalium chartaceum* (gordolobo) una planta nativa de México que se le atribuyen propiedades curativas (CONABIO, 2011), y *Bothriochloa* sp., una especie de pasto que al igual que *Festuca*, la mayor parte de su biomasa se encontró en las raíces. Estas plantas, junto con *Penstemon*, se encontraron en la parte más baja del gradiente creciendo junto a *Lupinus* en el sitio denominado “Xalitzintla”.

En la figura 40 se puede observar que las estructuras de mayor productividad en las plantas que se establecieron como especies acompañantes al género *Lupinus* fueron los tallos y las hojas excepto en las especies de pastos (*Festuca* y *Brothriochloa*) donde la mayor productividad fue la raíz ($p \leq 0.05$).



Figura 40. Partición de masa de las especies que se establecen en los sitios tipo y homólogos ordenados de mayor a menor altitud.

*Datos obtenidos de Correndo & García, 2012

Debido a que las leguminosas pueden satisfacer gran parte del requerimiento de **nitrógeno** por medio de la fijación simbiótica, las especies del género *Lupinus*, podrían formar parte de los sistemas de producción de los cultivos ayudando a satisfacer los requerimientos de nitrógeno en cultivares (Barrientos *et al.*, 2002, Zamora *et al.*, 2019)

El nitrógeno acumulado en el género *Lupinus* y el de las especies acompañantes se reporta en el cuadro 20 y las figuras 41 y 42. De las especies de *Lupinus*, la que acumuló mayor cantidad de nitrógeno fue *L. montanus* en “La Joya” seguido de *L. bilineatus*, *L. aschenbornii*, *L. elegans* y finalmente *L. montanus* del sitio “La Ranita” ($p \leq 0.05$).

El órgano vegetal que mostró mayor acumulación de nitrógeno en todas las especies fue la flor, en el caso particular de la especie *L. montanus*, a estas le siguen las hojas y los tallos (mayormente en *Lupinus aschenbornii*) ($p \leq 0.05$). *Lupinus bilineatus* es la especie con mayor acumulación de nitrógeno en vainas, 8 veces más ($p \leq 0.05$), puede que la presencia de semillas en las vainas estuviera influyendo en la mayor acumulación en este tejido.

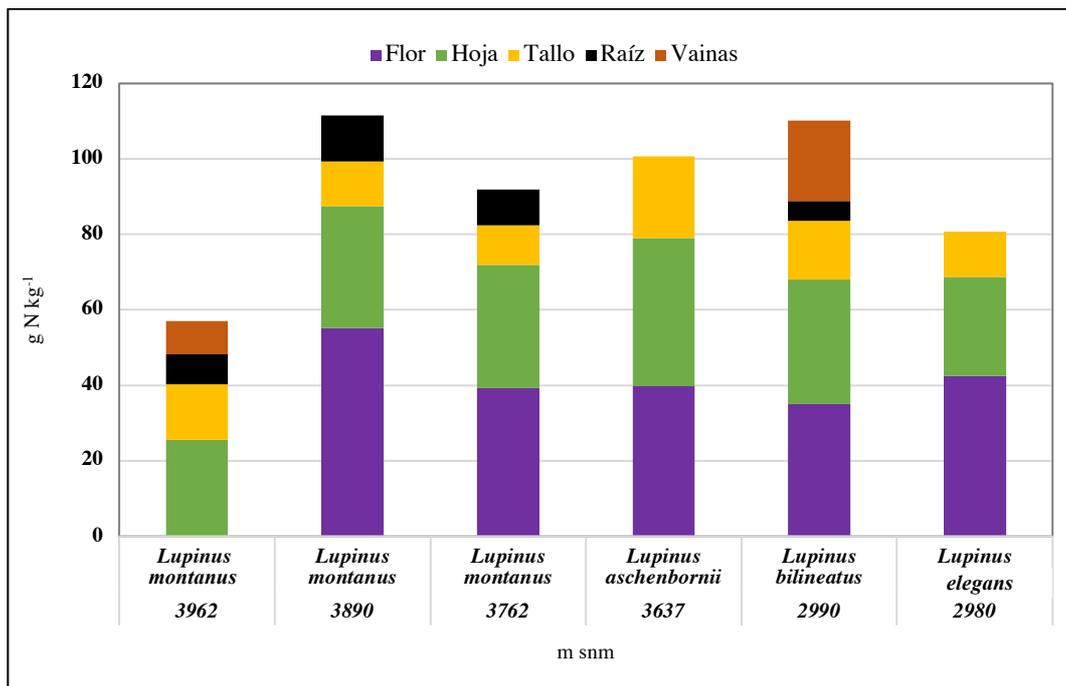


Figura 41. Acumulación de los gramos por kilogramos en biomasa por nitrógeno acumulado por parte.

Como se puede observar en la figura 43, *Lupinus* fue la especie de mayor acumulación de nitrógeno por localidad. Entre las especies acompañantes que acumularon mayor cantidad de nitrógeno, se encontró a *Conyza bonariensis* desde los 3962 m hasta los 3762 m, *Salvia divinorum* fue la especie de mayor acumulación en el sitio más bajo a los 2980 m.

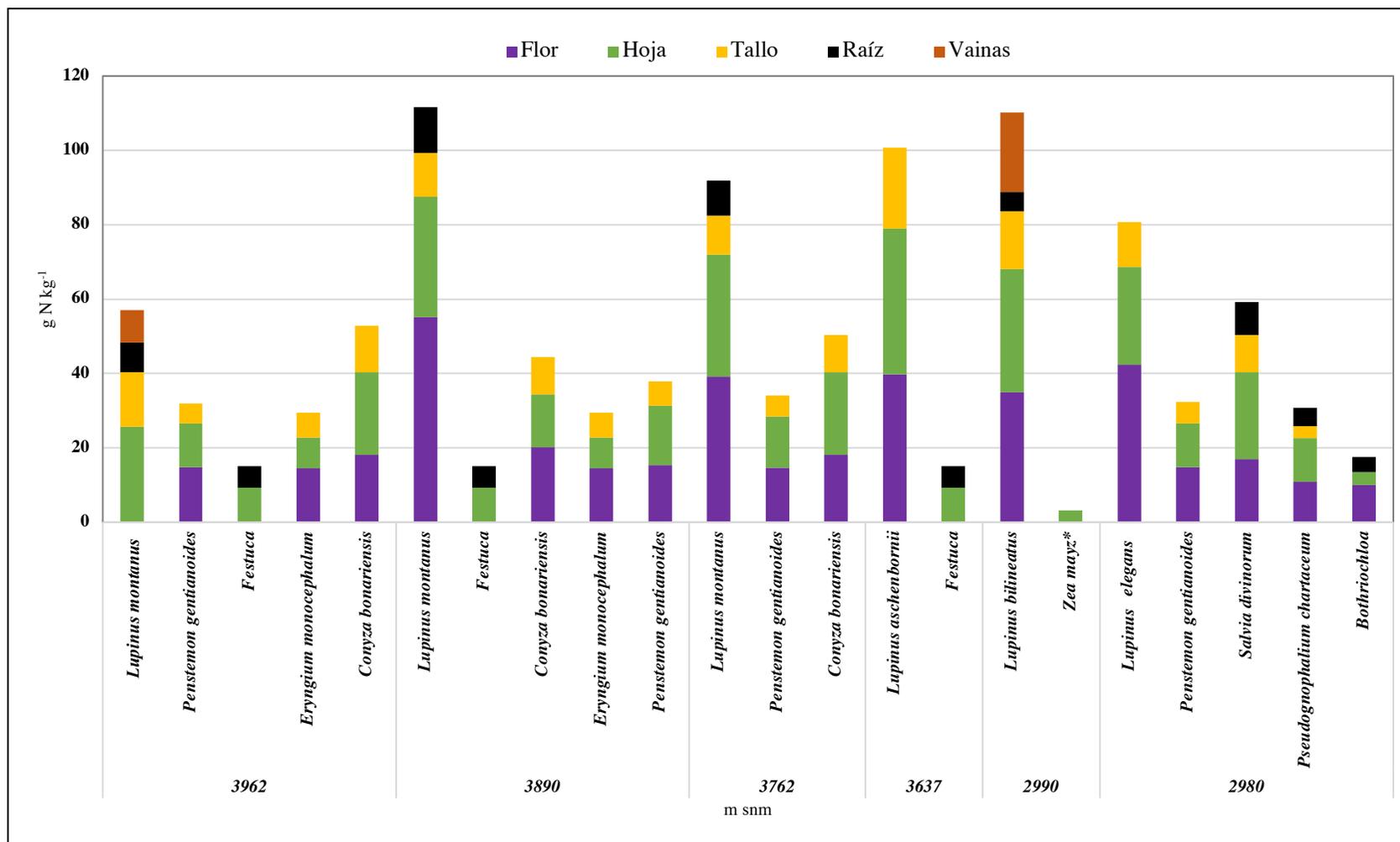


Figura 42. Acumulación de nitrógeno por kilogramo de planta por órgano en las especies registradas en los diferentes sitios donde se registró el establecimiento del género *Lupinus*.



Cuadro 20. Acumulación de gramos por kilogramo de nitrógeno por órgano en el género *Lupinus* y especies acompañantes.

SITIO	ALTITUD	ESPECIE	CONDICIÓN		NITRÓGENO					
			Tipo	Homólogo	Flor	Hoja	Tallo	Raíz	Vaina	Total
	m				g kg ⁻¹					
La Ranita	3962	<i>Lupinus montanus</i>	X		.	25.6	14.7	8	8.75	57
		<i>Penstemon gentianoides</i>	X	X	14.8	11.8	5.3	.	.	31.9
		<i>Eryngium monocephalum</i>	X	X	14.5	8.3	6.6	.	.	29.4
		<i>Conyza bonariensis</i>		X	18.1	22.3	12.4	.	.	52.8
		<i>Festuca</i>	X	X	.	9.3	.	5.8	.	15.1
La Joya	3890	<i>Lupinus montanus</i>	X		55.2	32.3	11.8	12.3	.	111.6
		<i>Conyza bonariensis</i>	X		20.2	14.2	10	.	.	44.4
		<i>Penstemon gentianoides</i>	X	X	15.4	15.9	6.6	.	.	37.9
		<i>Festuca</i>	X		.	9.3	.	5.8	.	15.1
Paso de Cortés	3762	<i>Lupinus montanus</i>	X		39.2	32.8	10.4	9.5	.	91.9
		<i>Penstemon gentianoides</i>	X		14.6	13.8	5.7	.	.	34.1
		<i>Conyza bonariensis</i>		X	18.1	22.3	10	.	.	50.4
Cascada Buenavista	3637	<i>Lupinus aschenbornii</i>	X		39.8	39.2	21.7	.	.	100.7
		<i>Festuca</i>		X	.	9.3	.	5.8	.	15.1
Potrero	2990	<i>Lupinus bilineatus</i>	X		35	33	15.6	5.3	21.3	110.2
		<i>Zea mayz*</i>		X	.	3.2	.	.	.	*
Xalitzintla	2980	<i>Lupinus elegans</i>	X		42.4	26.3	12	.	.	80.7
		<i>Penstemon gentianoides</i>	X	X	14.8	11.8	5.7	.	.	32.3
		<i>Bothriochloa</i>	X		10	3.5	.	4	.	17.4
		<i>Salvia divinorum</i>	X	X	16.9	23.5	10	8.8	.	59.2
		<i>Pseudognaphalium chartaceum</i>	X	X	10.8	11.8	3.2	5	.	30.8

* Promedio tomado de Correndo y García, 2012



Al comparar porcentajes de N en tejido vegetal de las especies de *Lupinus* reportadas en esta investigación (*Lupinus montanus*, 5.7-8.5%; *Lupinus aschenbornii*, 9.27%; *Lupinus bilineatus*, 9.27%; *Lupinus elegans*, 8.4%), se muestra mayor contenido de N respecto a especies cultivadas estudiadas por Correndo y García (2012) que muestran los valores de N en maíz (2.7 a 4%), arroz (2.6 a 4.8%), trigo (1.75-3.3%), cebada (1.2-1.7) y de Osorio (2012) que estudió al frijol (3.5 a 5%). Las diferencias en contenido de nitrógeno intraespecíficas que se observaron en las cuatro especies de esta investigación también fueron observadas por Barriento *et al.*, (2002) quienes encontraron que a 166 días de cosecha, las semillas de *Lupinus albus* contenía 6.08 % de nitrógeno y *Lupinus angustifolius* 3.68 % que ratifica los resultados reportados. Por otro lado, Zamora *et al.*, (2019) mostraron que la cantidad de nitrógeno acumulado en *Lupinus* al compararse con el de cebada fue 4 veces mayor en *Lupinus* (2.5% a 4%) que en cebada (1% a 2%).

La evaluación de la **Eficiencia de Uso de Nitrógeno (EUN)** del género *Lupinus* y especies acompañantes es importante debido a que este nutrimento con frecuencia es limitante para el desarrollo vegetal lo que reduce la síntesis de proteínas y aminoácidos (Alcantar & Trejo-Téllez, 2009; CIMMYT, 2020). La EUN se muestra en el cuadro 20 y los gráficos de las figuras 41 y 42 mientras que los estadísticos se reportan en el cuadro del anexo 3.

En la figura 42 se grafica EUN de las especies del género *Lupinus* se observó que por órgano la mayor eficiencia se presentó en flores, seguido de las hojas, tallos, vainas (con semillas) y raíces respectivamente ($p \leq 0.05$). Al comparar la EUN entre especies, se observó que la especie *Lupinus montanus* del sitio “La Joya”, tuvo el mayor valor seguido de *L. achenbornii*, *L. elegans* y la menor EUN se registró en *Lupinus bilineatus* ($p \leq 0.05$).

La acumulación de fósforo en flores *Lupinus* se reporta el cuadro 21 y se muestra en la figura 43. Los resultados mostraron que, como en el caso de nitrógeno, *Lupinus montanus* y *Lupinus elegans* tuvieron la mayor acumulación de fósforo en tejido foliar mientras que los menores valores se presentaron en *Lupinus aschenbornii* y *Lupinus bilineatus* ($p \leq 0.05$).

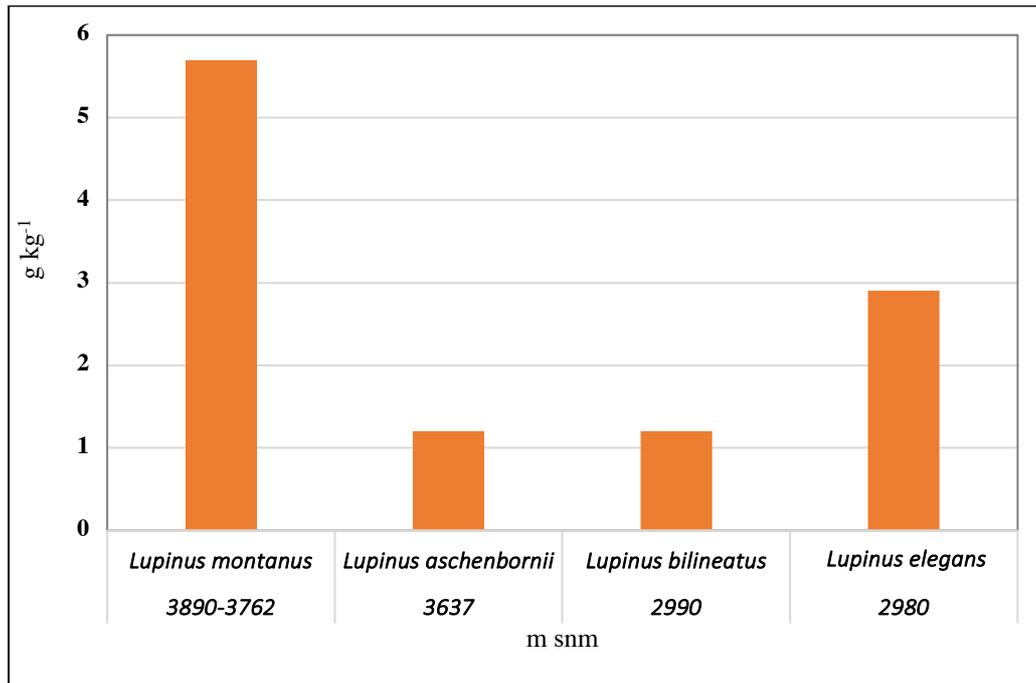


Figura 43. Contenido de fósforo en flores de *Lupinus*.

Cuadro 21. Fósforo acumulado en tejido foliar del género *Lupinus*.

Sito	Altitud ____ m ____	Especie	Acumulación en Tejido Vegetal (Flor) ____ g kg ⁻¹ ____
<i>La Joya- Paso de Cortés</i>	3890-3762	<i>Lupinus montanus</i>	5.7
<i>Cascada Buenavista</i>	3637	<i>Lupinus aschenbornii</i>	1.2
<i>Potrero</i>	2990	<i>Lupinus bilineatus</i>	1.2
<i>Xalitzintla</i>	2980	<i>Lupinus elegans</i>	2.9



Descripción general de propiedades de suelos, sobre un gradiente altitudinal, donde se desarrolla *Lupinus* en el PNI-P y su zona de influencia

Junto a los seis lugares que fueron visitados y denominados **sitios tipo** se encontraron 84 sitios reportados por lo 12 autores en el cuadro 22 que en sus descripciones, desde el año 2009 al año 2021, reportan el establecimiento de *Lupinus* y cuentan con similares condiciones edafológicas, altitudinales, climáticas, de posición respecto a la zona del Parque y de vegetación. Esta última aseveración se fundamentó con ayuda de las herramientas de Google Earth Pro 7.3.3.7786 y de Qgis 3.18.1-Zürich.

Cuadro 22. Sitios reportados en la literatura con presencia de *Lupinus*.

G	Localidad	Latitud	Longitud	Altitud	Autor
		X	_Y_		
		m			
1	A	537138	2116365	4000	(Cornejo, 2019)
	La Ranita*	537650	2115807	3962	(Hernández, 2020), (Guerra, 2020) (Sandoval, 2016) (Santiago, 2018)
	La Joya*	536940	2116534	3890	(Guerra, 2020)
	B	537010	2114406	3883	(Ayala, 2011), LENV-8
	C	536608	2116380	3858	LENV-8
	D	536501	2116231	3832	LENV-8
	E	535866	2116294	3800	(Cornejo, 2019)
	F	535758	2116618	3800	(Cornejo, 2019)



Continuación del Cuadro 22. Sitios reportados en la literatura con presencia de *Lupinus*.

2	Paso de Cortes*	536812	2111879	3762	(Valderrábano, 2013)
	G	538758	2110659	3735	(Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020) (Suastegui, 2009)
	H	535280	2112632	3700	(Mascot, 2013)
	I	538595	2112404	3690	(Guerra, 2020) (Suastegui, 2009)
	J	535271	2112631	3659	(Guerra, 2020), LENV-8
	L	538622	2110914	3641	LENV-8
	M	537527	2111367	3638	(Suastegui, 2009)
	O	535323	2112480	3520	(Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Martínez, 2012) (Ayala, 2011)
3	Buenavista*	539303	2113118	3637	(Santiago, 2018), (Ayala, 2011)
	N	539313	2112874	3600	(Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Martínez, 2012), (Ayala, 2011)
	VP	539397	2111719	3500	(Mascot, 2013), (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Ayala, 2011)
	R	541481	2110923	3347	(Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Martínez, 2012), (Guerra, 2020)
	US	542037	2111204	3309	(Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Pérez, 2017) (Guerra, 2020)
4	K	536986	2108782	3642	(Martínez, 2012)
	Q	534565	2109811	3458	LENV-8, (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020)
	T	533641	2110371	3306	LENV-8, (Santiago, 2018), (Hernández, 2020), (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Guerra, 2020)
	Potrero*	530530	2109428	3290	(Mascot, 2013), (Ayala, 2011), (Dominguez, 2011)
5	Xalitzintla*	546935	2109694	2980	
	W	545460	2109544	2973	LENV-8, (Santiago, 2018), (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020),
	X	545988	2109755	2959	LENV-8
	Y	547632	2109601	2816	(Suastegui, 2009), (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), LENV-8
	Z	547792	2111726	2700	(Hernández, 2020), (Cruz-Flores <i>et al.</i> , 2020), (Pérez, 2017), (Santiago, 2018)

* Sitios tipo reportado y descritos en este trabajo. G= grupo



Posteriormente se utilizó la herramienta Buffer simple de 3 aristas (disueltas si el próximo perímetro toca) con un área de 250 m² con base en los trabajos de Hernández (2020), Guerra (2020) y Santiago (2018). Tanto los sitios tipo como los sitios descritos por los autores citados, fueron seleccionados por la inclinación de la pendiente del terreno, exposición solar, grupo y uso de suelo.

Se discriminaron 84 registros en 30 sitios que, mencionan en sus descripciones la presencia de *Lupinus*, algunos de ellos fueron estudiados en diferentes intervalos de tiempo. Considerando esta información, se formaron cinco grupos altitudinales de plantas de *Lupinus* y, según el mapa de la figura 43, corresponde a un área total de estudio de 652.1 ha. Se presentan las divisiones por grupo en el cuadro 23.

Cuadro 23. Área de las zonas de muestreo designadas por buffer.

Grupo	Intervalo De Altitud	Área	Sitio	Especie
"G"	___ m ___	ha		
1	4000 – 3800	163.6	La Joya, La Ranita	<i>Lupinus montanus</i>
2	3762 – 3638	112.5	Paso de Cortés	<i>Lupinus montanus</i>
ÁREA DEL PARQUE		276.1		
3	3637 – 3300	175.8	Cascada Buenavista	<i>Lupinus aschenbornii</i>
4	3458 – 2965	75.1	Potrero	<i>Lupinus bilineatus</i>
5	2980 – 2679	125.1	Xalitzintla	<i>Lupinus elegans</i>
ZONA DE INFLUENCIA		376.0		
TOTAL		652.1		4 especies

Los grupos fueron designados con un color específico en las gráficas como se indica en el cuadro 24.

Cuadro 24. Orden de los grupos asignados a los sitios de mayor a menor altitud.

GRUPO	SITIOS*	GRADIENTE ALTITUDINAL	COLOR DEL GRUPO
		___ m ___	
1	La Ranita, La Joya	4000 - 3800	
2	Paso de Cortés	3762 - 3520	
3	Cascada Buenavista	3637 - 3309	
4	Potrero	3642 - 3290	
5	Xalitzintla	2980 - 2700	

*Sitios visitados y descritos ecológicamente como el tipo, agrupados en ese nivel altitudinal.

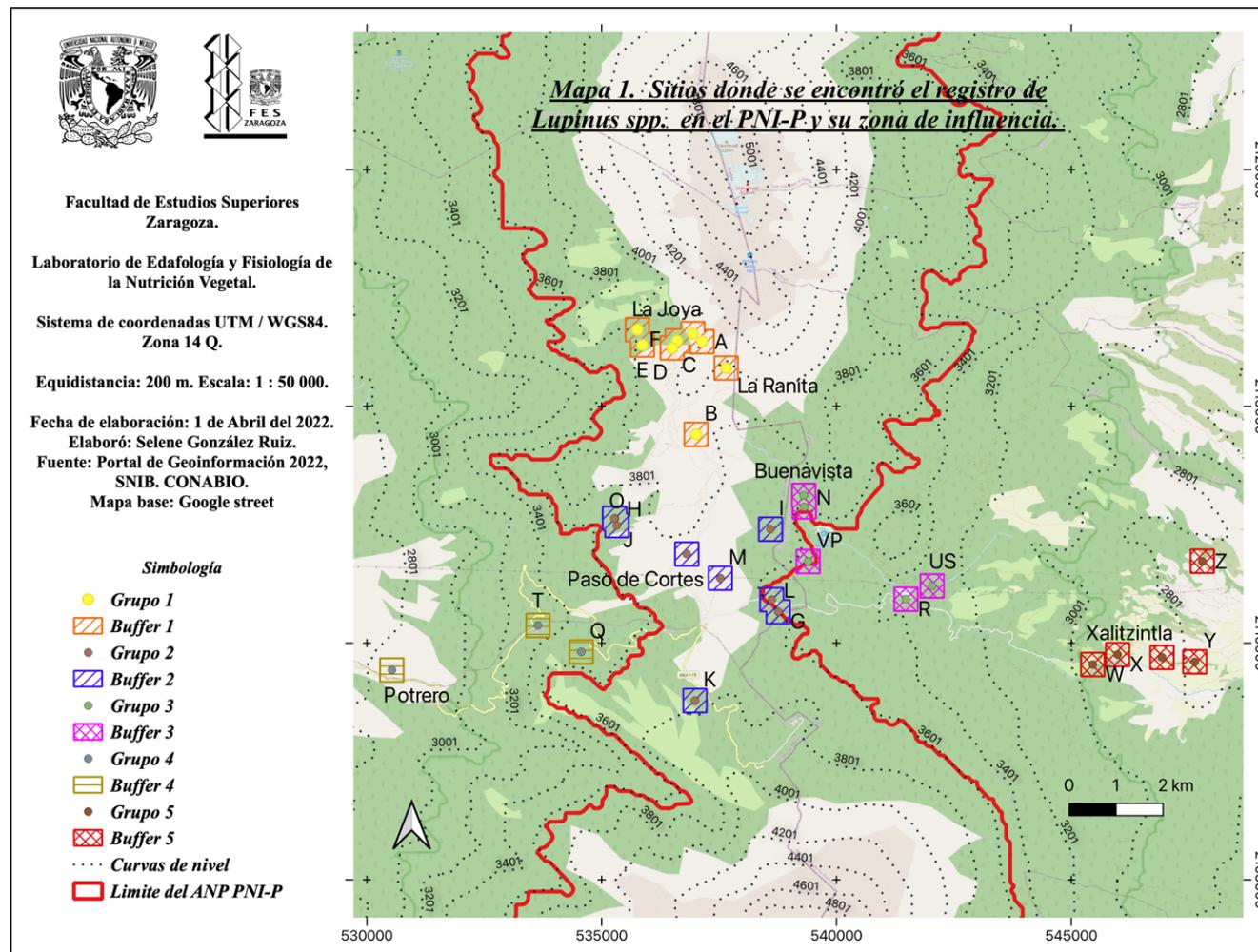


Figura 44. Mapa 1. Sitios donde se encontró el registro del género *Lupinus* en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia, además de la marca de una zona buffer de cada sitio.

El primer grupo ubicado al norte del parque fue designado como “G1” se establece en la zona alta de la reserva del PNI-P situada entre los 3800 y 4000 m esta es la zona de mayor conservación donde se reporta la presencia de *Lupinus montanus*, en esta área se encuentran dos sitios tipo nombrados “La Ranita y La Joya”. El G2 es un grupo que también pertenece a la zona de reserva, estos sitios se encuentran a una altitud de entre 3638 y 3762 m donde se aglomeró “Paso de Cortés”. En tercer conjunto de sitios (G3) se encuentra agrupado “Cascada Buenavista” y se encuentra entre los 3300 y 3637 m. El grupo G4 se nombró a “Potrero” como el sitio tipo agrupándose entre los 2965 y 3458 m. En el quinto y último grupo (G5) se encuentra el sitio tipo “Xalitzintla” entre los 2679 y los 2980 m (Figura 45).

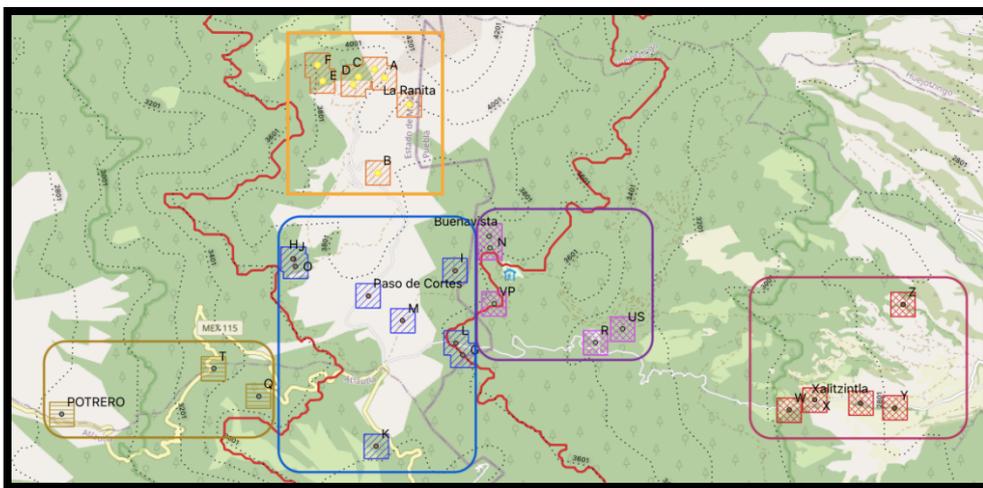


Figura 45. Agrupación de las zonas estudiadas de acuerdo a la ubicación con respecto al parque, exposición, altitud y avistamiento del género *Lupinus*.

Como se observó en la figura 45, a cada se le designó un conjunto de sitios, por las características compartidas antes mencionadas, con cierto número de lugares georreferenciados que son reportados como “subsitos” a los que les corresponde una “n” de repeticiones debido a que algunos sitios fueron visitados más de una vez en intervalos de tiempo distintos (Cuadro 22).

Propiedades físicas de los suelos donde se establece el género *Lupinus*

La textura como variable maestra del suelo es un parámetro que influye sobre muchas otras propiedades físicas y químicas por el porcentaje relativo de las partículas del suelo (Cuadro 25).

En los suelos de los cinco grupos altitudinales donde crece *Lupinus* las partículas de arena representan la mayor fracción (>70%), seguidas de los limos (14 a 17 %) y de las arcillas (6.6 % o menos) como se ilustra en la figura 46. En general, en los cinco grupos los suelos fueron mayormente arenosos ($p \leq 0.05$). Por clase textural, en los grupos altitudinales 1, 2, 3 y 5, dominan los suelos con textura franco-arenosa y en el grupo altitudinal 4, 60% de su superficie presentó textura arenosa.

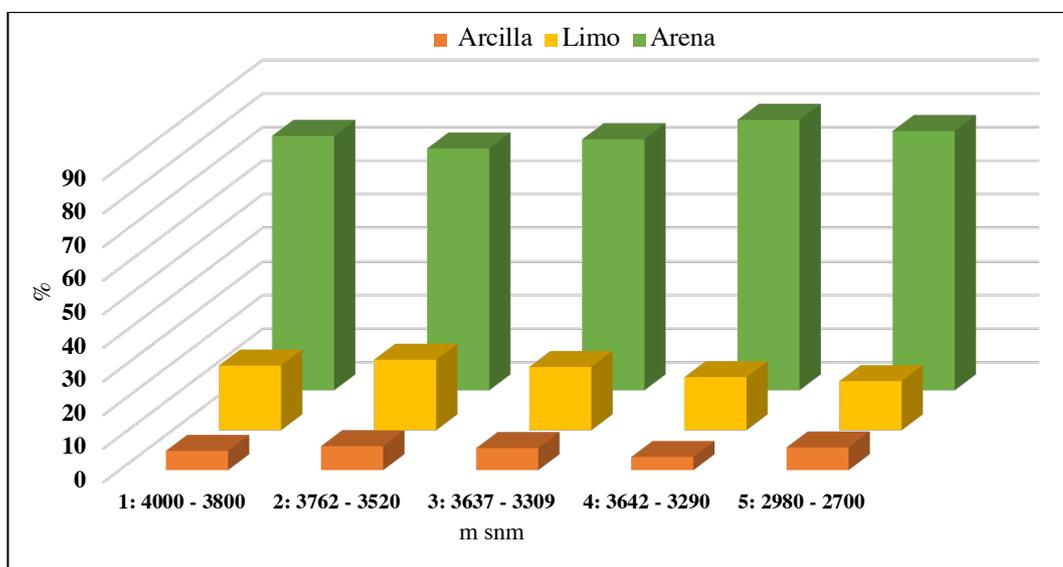


Figura 46. Fracciones separatas en el suelo representado por grupo.

La porosidad como propiedad que influye en el crecimiento radicular y la dinámica del aire y del agua en el suelo (Rucks, 2004), está determinada por el **espacio poroso** (EP) de gran importancia y que se calcula mediante las densidades real (D.R.) y aparente (D.A.) (Castillo, 2005).

El EP de los suelos de cada grupo altitudinal donde se encuentra *Lupinus* tiende a estar por arriba de 60% ($p \leq 0.05$), excepto en el grupo altitudinal 2 donde el espacio poroso se encuentra entre 32 y 43%. El gráfico de la figura 47 muestra que los valores de las medias del espacio poroso superan el 55% excepto en el grupo 2.

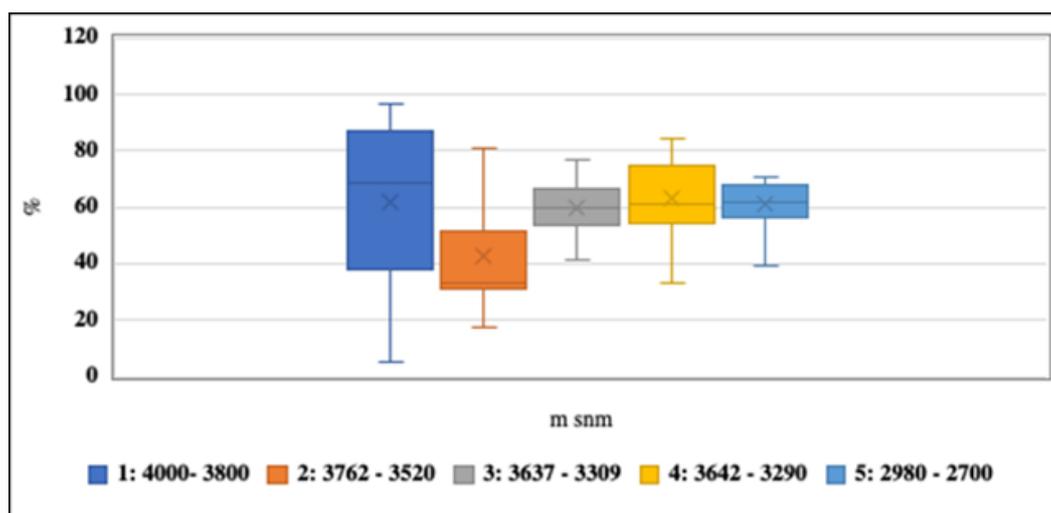


Figura 47. Rango intercuartílico entre los porcentajes de espacio poroso en los grupos donde se establece *Lupinus*.

Con respecto a la D.A., los sitios estudiados presentan valores de densidad típicos de suelos volcánicos, es decir la distribución de los datos tiende a una asimetría negativa, valores $< 1 \text{ g cm}^{-3}$ clasificándose como suelos de densidades de baja a muy baja ($p \leq 0.05$) (Cuadro 25).

Los valores promedio de la **densidad aparente** de los suelos por grupo altitudinal, fueron menores a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 48) por lo que, según Cruz-Flores (2006), no poseen cantidades anormales de minerales pesados y en cambio sí poseen altos porcentajes de materia orgánica ($p \leq 0.05$), lo que concuerda con los resultados obtenidos.

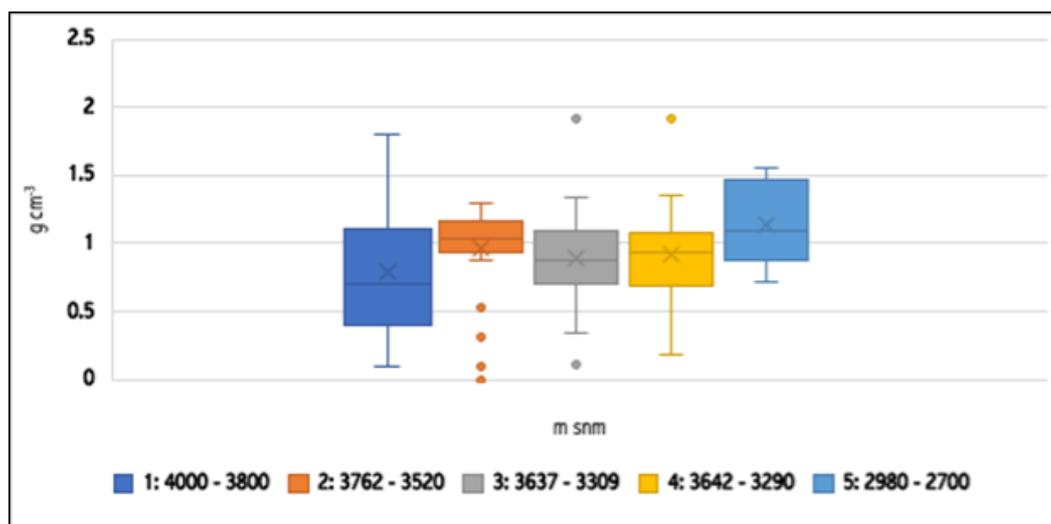


Figura 48. Densidad aparente para los cinco grupos donde se encuentra *Lupinus*.



Los resultados de D.A. y EP que se presentan, concuerdan con lo que reporta Ramírez (1997) que reportó que la relación entre espacio poroso y densidad aparente es inversamente proporcional; es decir cuando la D.A. aumenta el EP disminuye.

Los porcentajes de HS de los suelos en los grupos altitudinales mostraron una media menor al 30%, excepto los suelos del grupo 1 donde la media fue de 41.7% ($p \leq 0.05$). Estos suelos pertenecen a la zona de alta montaña y presentan el mayor estado de conservación (Cuadro 25).



Cuadro 25. Propiedades físicas de los suelos por grupo.

Parámetro	Densidad		HS	EP	Arcilla	Limo	Arena
	Real	Aparente					
	g cm ⁻³		%				
<i>GRUPO 1 (Lupinus montanus)</i>							
Máximo	2.7	1.8	76.7	96.4	14.5	32	90
Mínimo	1.7	0.1	11.1	5.0	0.6	5	57
Media	2.5	0.8	41.7	62.1	5.7	19.2	75.7
Moda	2.7	0.4	23.7	37.9	5.4	12	82.6
Mediana	2.7	0.7	49	68.7	5.4	20	77.8
Desviación estándar	0.3	0.5	20.6	26.9	3.2	5.9	7.7
(n)	39	74	19	41	61	61	61
<i>GRUPO 2 (Lupinus montanus)</i>							
<i>n</i>							
Máximo	2.7	1.3	69.5	81.1	10.3	29.3	84.6
Mínimo	2.2	0.1	2.1	17.4	3.4	10	64
Media	2.6	0.9	28.6	43	7.1	20.9	71.9
Moda	2.7	0.9	5.7	48.5	10.3	22	67.7
Mediana	2.7	1.1	29.8	33.2	6.5	22	68.7
Desviación estándar	0.2	0.3	17.8	19.5	2.3	5.5	6.8
(n)	13	31	21	14	18	18	18
<i>GRUPO 3 (Lupinus aschenbornii)</i>							
<i>n</i>							
Máximo	2.7	1.9	52.1	76.9	14	28	83.8
Mínimo	1.6	0.1	7.4	41.2	2	8.3	64
Media	2.3	0.9	25.6	59.8	6.5	18.8	74.7
Moda	2.7	1	.	58.1	6	20	74
Mediana	2.3	0.9	23.2	58.9	6	19.3	74
Desviación estándar	0.4	0.3	12.4	8.8	2.3	3.94	3.9
(n)	18	51	24	34	38	38	38
<i>GRUPO 4 (Lupinus bilineatus)</i>							
<i>n</i>							
	11	22	12	16	18	18	18
Máximo	2.7	1.9	42.0	84.3	10	30	93.6
Mínimo	2.3	0.2	7.4	33.1	0.1	5	64
Media	2.5	0.9	18.8	63.7	3.9	15.8	80.4
Moda	2.7	1	.	.	1.4	10	88.6
Mediana	2.7	0.9	14	61.9	3.4	12.5	85.3
Desviación estándar	0.2	0.3	12.6	13.7	2.9	8.5	10.6
<i>GRUPO 5 (Lupinus elegans)</i>							
<i>n</i>							
	18	33	4	14	28	28	28
Máximo	2.8	1.6	26.2	70.9	28	28	89.3
Mínimo	1.9	0.7	5.8	39.1	1.4	1.4	58
Media	2.4	1.1	14.2	61.1	8.1	14.6	77.1
Moda	.	0.8	.	60.7	5.7	10.2	81.5
Mediana	2.4	1.1	12.5	61.8	5.8	13.4	76.8
Desviación estándar	0.2	0.3	10.1	8.9	6.3	7.9	7.5

C.E.= conductividad eléctrica, HS= humedad en el suelo, EP= espacio poroso

Propiedades químicas de los suelos donde se establece *Lupinus*

El pH es una variable maestra porque se relaciona con muchas otras propiedades que influyen directa e indirectamente con la disponibilidad de los minerales para el desarrollo vegetal y el de los organismos que viven en el suelo.

pH activo y potencial y Delta pH. Los valores promedio de pH activo (1:2) del suelo por grupo altitudinal tienden a ser moderadamente ácidos en todos los casos (5.7 a 5.9) encontrando los de mayor acidez con valores 4.2 y los menos ácidos en 7.1 para todos los grupos de suelos ($p \leq 0.05$). Por lo que puede decirse que el género *Lupinus* se establece en general en suelos moderadamente ácidos (NOM-021-RECNAT-2000).

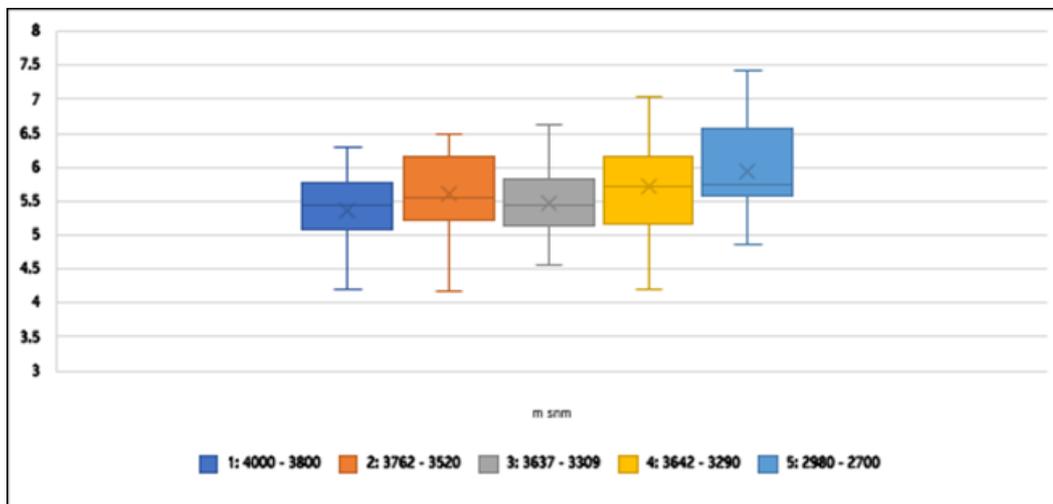


Figura 49. Distribución altitudinal del pH activo.

En suelos ácidos, como los que se presentan a lo largo del gradiente altitudinal (Cuadro 26), se ha observado que cuando el suelo se satura con una solución como el KCl o CaCl₂ (pH potencial) los iones hidrógeno del complejo de cambio suelen ser liberados incrementando la acidez del suelo (Soriano, 2018).

Los valores del Δ pH, relación entre pH activo y pH potencial, mostraron para todos los grupos altitudinales valores promedio cercanos a 0.9 por lo que los suelos donde se establece *Lupinus* tienden a estar desaturados “desbasificados” (Δ pH menor a 1) sin embargo, en los suelos del grupo 2 son los que tienen la mayor saturación de bases (Figura 50, $p \leq 0.05$).

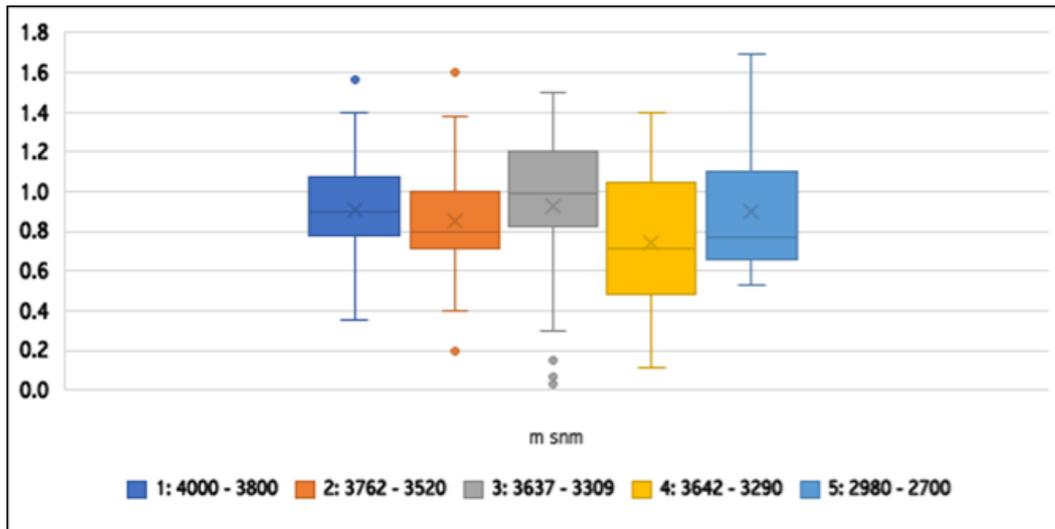


Figura 50. Distribución de los datos por grupo de los valores encontrados de delta pH.

La cantidad de sodio y sales solubles en el suelo determina si un suelo es salino o no, además, el contenido de sales influye en el potencial osmótico en el suelo lo que influye en el intercambio de agua y nutrientes con las raíces de las plantas (FAO, 2021). Según la NOM NOM-021-RECNAT-2000, *Lupinus* se establece en suelos no salinos (figura 51), o de salinidades despreciables en todos los sitios ($p \leq 0.05$). Esto coincide con lo reportado en los trabajos de Cruz-Flores *et al.*, 2020 y Valderrábano, 2013.

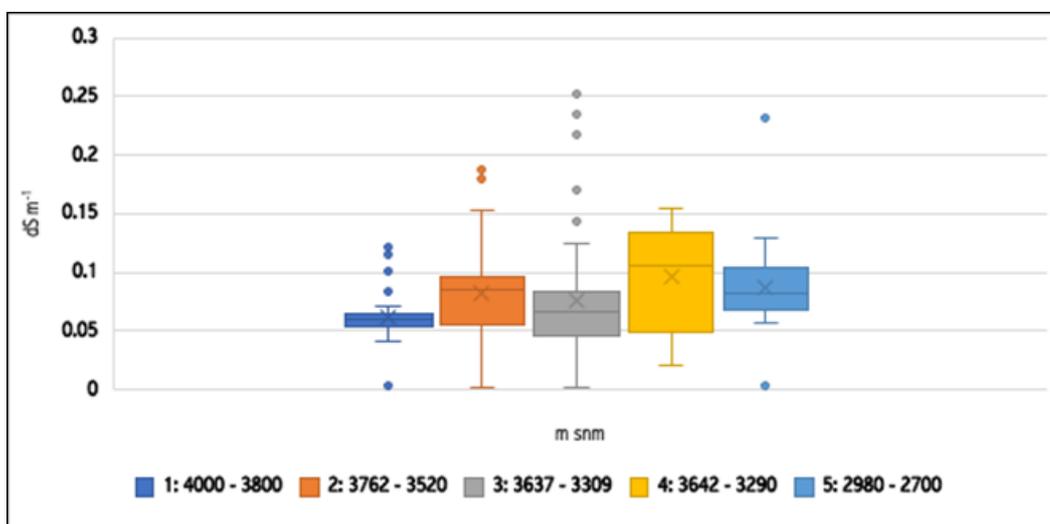


Figura 51. Conductividades eléctricas de los grupos de suelo.



Cuadro 26. Propiedades químicas de los suelos por grupo.

Parámetro	pH						C.E dS m ⁻¹
	_ Activo _		_ Potencial _		Δ		
	H ₂ O	CaCl ₂	KCl	CaCl ₂	KCl	CaCl ₂ + KCl	
	1 : 2						1 : 5
<i>GRUPO 1 (Lupinus montanus)</i>							
	<i>n</i>						
	90	35	30	35	30	65	79
Máximo	6.3	5.1	5.3	1.6	1.6	1.6	0.3
Mínimo	4.2	3.5	3.9	0.4	0.4	0.4	0.001
Media	5.7	4.3	4.6	0.9	0.9	0.9	0.1
Moda	5.6	4.8	4.7	0.8	0.6	0.8	0.1
Mediana	5.5	4.0	4.7	0.9	0.9	0.9	0.1
Desviación estándar	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1
<i>GRUPO 2 (Lupinus montanus)</i>							
	<i>n</i>						
	37	18	16	18	16	34	38
Máximo	6.5	5.8	4.9	1.4	1.6	1.6	0.2
Mínimo	4.2	4.4	3.9	0.2	0.6	0.2	0.001
Media	5.6	5.2	4.3	0.8	0.9	0.9	0.1
Moda	5.9	4.9	4.3	0.6	1.2	0.6	0.1
Mediana	5.5	5.2	4.3	0.8	0.8	0.8	0.1
Desviación estándar	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.04
<i>GRUPO 3 (Lupinus aschenbornii)</i>							
	<i>n</i>						
	65	18	15	18	15	33	53
Máximo	6.6	5.3	5.6	1.2	1.5	1.5	0.8
Mínimo	4.6	3.7	3.4	0.03	0.3	0.03	0.001
Media	5.5	4.4	4.7	0.8	1.0	0.9	0.1
Moda	5.4	4.5	4.7	.	1.2	1.2	0.1
Mediana	5.4	4.5	4.7	0.9	1.2	1.0	0.1
Desviación estándar	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.1
<i>GRUPO 4 (Lupinus bilineatus)</i>							
	<i>n</i>						
	28	2	23	8	17	25	22
Máximo	7.0	5.1	5.9	1.1	1.4	1.4	0.7
Mínimo	4.2	5.1	4.6	0.5	0.1	0.1	0.02
Media	5.7	5.1	4.9	0.8	0.7	0.7	0.1
Moda	6.2	.	4.9	.	1.3	1.3	.
Mediana	5.7	5.1	4.9	0.9	0.7	0.7	0.1
Desviación estándar	0.7	0.0	0.4	0.2	0.4	0.4	0.1
<i>GRUPO 5 (Lupinus elegans)</i>							
	<i>n</i>						
	47	21	12	21	12	33	39
Máximo	7.1	5.1	5.8	1.7	1.6	1.7	0.8
Mínimo	4.9	4.2	4.4	0.5	0.6	0.5	0.002
Media	5.9	4.7	4.9	0.9	0.9	0.9	0.1
Moda	5.2	5.1	4.4	0.6	.	0.6	0.1
Mediana	5.7	4.8	4.9	0.7	0.9	0.8	0.1
Desviación estándar	0.7	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1

Materia y Carbono orgánicos del suelo donde se estableció *Lupinus*

La cantidad de materia orgánica en descomposición y la disponibilidad de nutrientes que hay en un suelo se relacionan con las cantidades de C en biomasa microbiana, lo que hace a este parámetro un buen indicador de la calidad del suelo (Cruz-Flores *et al.*, 2019). Las medias de los suelos donde se estableció *Lupinus* son de clase media en los grupos 1, 2 y 3, para los grupos 4 y 5 los contenidos de MOS los colocan en clase baja (Figura 52).

El cuadro 26 muestra que los contenidos de materia orgánica tienen una distribución que mostró que los grupos con mayor contenido son el grupo 3 (21.5%) y el grupo 1 (17.7%), por otra parte los contenidos de materia orgánica en los grupos 4 (10.5%) y 5 (9.2%) tienden a ser de medios a pobres respectivamente. Puede concluirse que a pesar de que los datos no son significativamente estadísticos las medidas del porcentaje de MOS tienden a disminuir conforme la altitud disminuye.

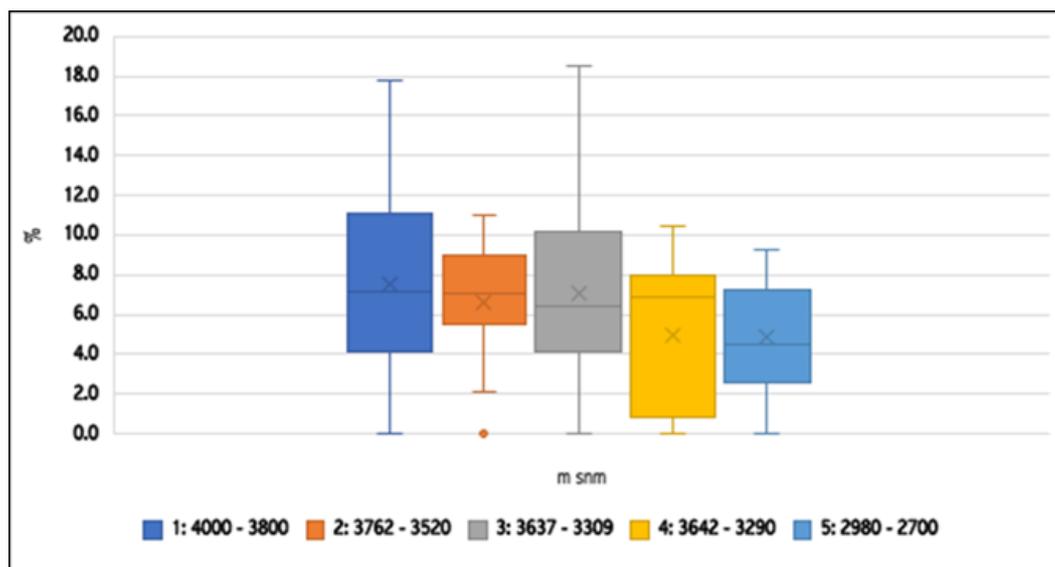


Figura 52. Distribución de los datos por grupo para materia orgánica.

El nitrógeno es usado por los organismos para producir aminoácidos que a su vez forman proteínas que construyen las células, además es importante en el desarrollo de las plantas al formar parte de la clorofila que es el compuesto por el cual las plantas usan la energía de la luz solar para producir azúcares a partir de la fotosíntesis (CIMMYT, 2020). Todos los grupos de suelos donde se establece *Lupinus* mostraron que por las medias para el nitrógeno menor a 0.3% se clasifican como suelos de contenidos bajos ($p \leq 0.05$). En la figura 53 se muestra la tendencia a disminuir el contenido conforme disminuye la altitud.

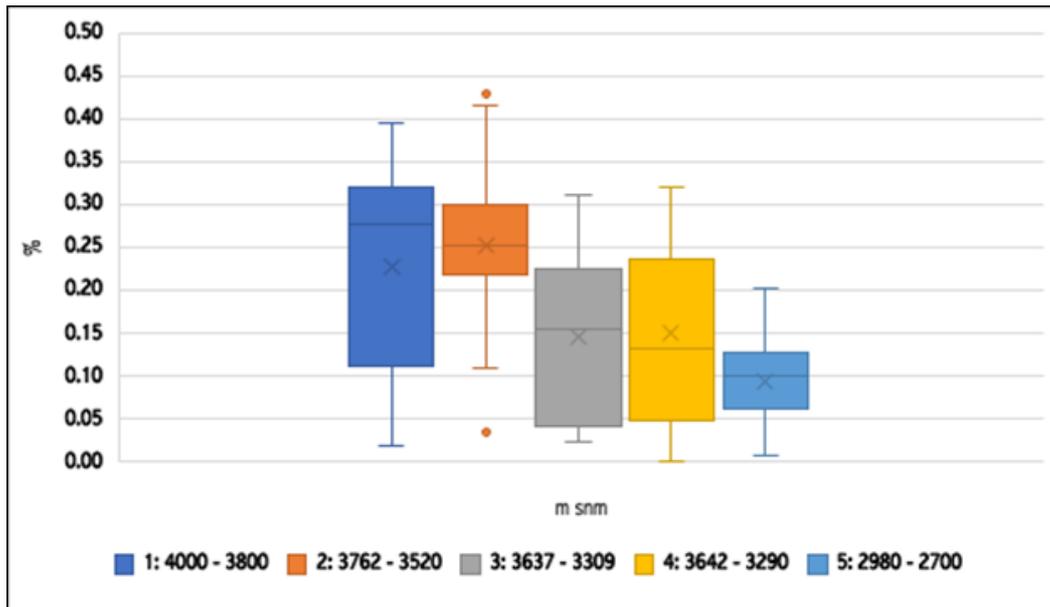


Figura 53. Distribución de los datos de nitrógeno en los cinco grupos de suelo.

El fósforo es un elemento que se pone disponible en el suelo principalmente por procesos de intemperismo y mineralización de la materia orgánica haciendo que se encuentre de manera limitada en el suelo, aún más que el nitrógeno, siendo este un problema ya que este elemento es importante para la fotosíntesis y el almacén de C en los ecosistemas (Dolman, 2019). Las medias para los cinco grupos de suelos (Cuadro 29), fueron clasificadas como suelos pobres excepto el grupo 2 donde se encuentran valores más altos (73.8 mg kg^{-1}) y para los grupos 1, 3, 4 y 5 la media es menor a 50 mg kg^{-1} ($p \leq 0.05$), la distribución se observa en la figura 54.

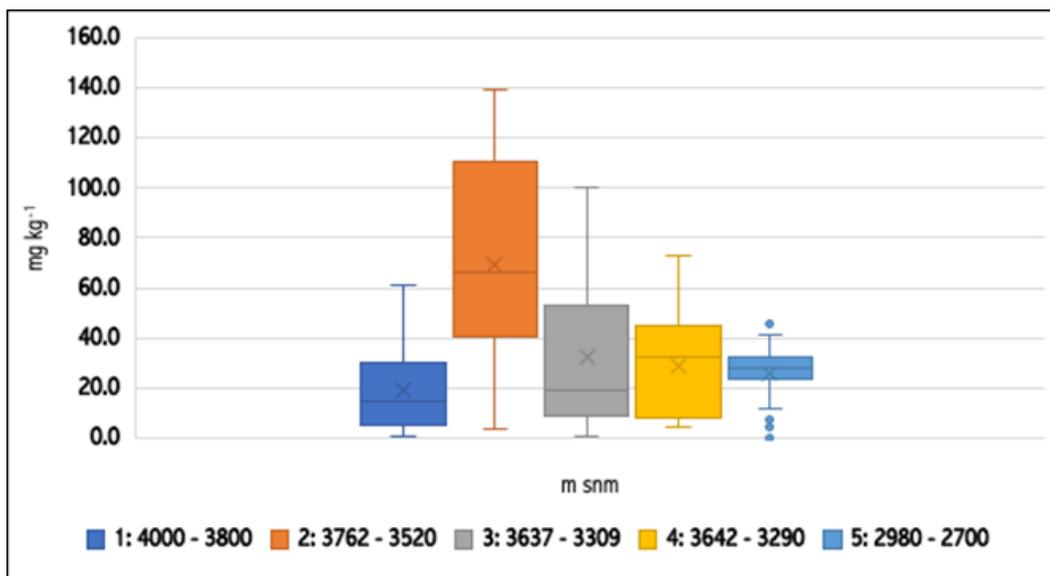


Figura 54. Medidas de tendencia central para los valores de fósforo por cada grupo.



Continuación... Cuadro 26. Propiedades químicas del suelo por grupo

Parámetro	MOS	COS	N-t	COS	N-t	Fósforo
		%		g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹
GRUPO 1 (<i>Lupinus montanus</i>)						
	<i>n</i>					
	84	84	74	87	82	60
Máximo	17.7	10.3	0.4	128.4	3.9	127.9
Mínimo	0.7	0.4	0.02	4.0	0.2	1.1
Media	7.7	4.3	0.2	45.2	2.3	27.1
Moda	6.7	3.6	0.3	36.0	3.2	3.7
Mediana	7.4	4.0	0.2	43.6	2.7	20.2
Desviación estándar	4.2	2.4	0.1	27.3	1.1	26.1
GRUPO 2 (<i>Lupinus montanus</i>)						
	<i>n</i>					
	41	41	46	43	46	30
Máximo	18	9.7	0.7	144.7	6.8	138.9
Mínimo	2.1	1.2	0.04	11.6	0.4	14.7
Media	7.6	4.1	0.3	44.7	2.8	73.8
Moda	8.3	4.5	0.2	44.8	2.3	115.4
Mediana	7.1	3.8	0.3	40.8	2.6	71.7
Desviación estándar	2.5	1.4	0.1	22.9	1.4	36.4
GRUPO 3 (<i>Lupinus aschenbornii</i>)						
	<i>n</i>					
	44	50	48	56	48	45
Máximo	21.5	12.5	1	189.6	9.8	99.9
Mínimo	1.9	1.0	0.02	10.2	0.2	0.9
Media	7.6	4.6	0.3	58.9	2.6	32.2
Moda	12.1	6.5	0.03	65.4	0.3	8.7
Mediana	6.7	4.1	0.2	43.3	1.8	19.2
Desviación estándar	4.3	2.8	0.3	47.2	2.8	27.7
GRUPO 4 (<i>Lupinus bilineatus</i>)						
	<i>n</i>					
	20	26	28	27	28	22
Máximo	10.5	8.2	0.9	130.0	9.2	72.9
Mínimo	0.1	0.1	0.02	0.5	0.2	4.4
Media	5.7	3.5	0.1	38.7	1.3	33.1
Moda	10.5	3.4	0.05	33.8	0.5	8.6
Mediana	7.2	3.9	0.1	39.2	0.7	37.5
Desviación estándar	3.8	2.2	0.2	28.5	1.7	24.2
GRUPO 5 (<i>Lupinus elegans</i>)						
	<i>n</i>					
	41	43	39	42	39	33
Máximo	9.2	5	0.4	49.8	4.5	101.9
Mínimo	0.6	0.3	0.01	3.5	0.1	4.1
Media	5.0	2.4	0.1	23.9	1.2	32.9
Moda	7.6	4.1	0.1	41.1	0.8	23.9
Mediana	4.5	2.1	0.1	20.2	1.1	30
Desviación estándar	2.6	1.3	0.1	12.9	0.9	21.7

La relación C:N indica la cantidad de tasa de nitrógeno disponible para las plantas, valores altos mostrarían que la MOS se descompone lentamente y, por el contrario, valores entre 10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura rápida de los tejidos (Gamarra *et al.*, 2017), además de ser un indicador de fertilidad en el suelo (Jian *et al.*, 2021). En el cuadro 27 se muestran las relaciones C:N para los suelos por grupo, los resultados mostraron que las medias del grupo 2 contiene los valores más bajos seguido de los grupos 1, 3, 5 y 4 ($p \leq 0.05$), como se muestra en la cuadro 29 y la figura 55, respectivamente. Los valores más altos de relación se presentaron en el grupo 4.

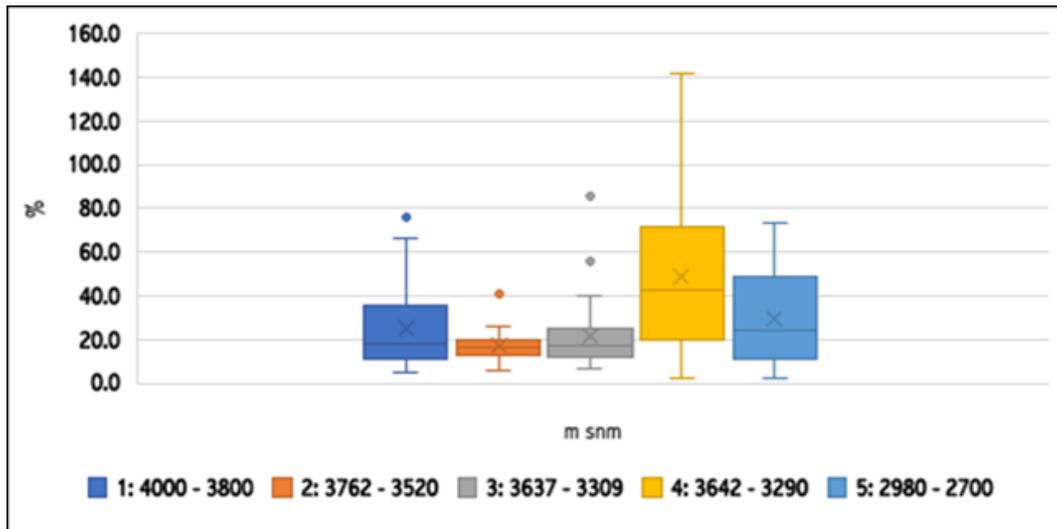


Figura 55. Medidas de tendencia central para la relación C:N presentes en los grupos de suelos.

En los cultivos, la disponibilidad de nitrógeno junto con el fósforo determina el crecimiento vegetal (Cruz-Flores, 2006; Alcantar & Trejo-Téllez, 2009; Rincón & Gutiérrez, 2012), las plantas a través de exudados radiculares proporcionan un ambiente que estimulan el desarrollo en las comunidades bacterianas lo que puede influir de manera directa en la productividad vegetal (Cruz-Flores, 2006; Rincón & Gutiérrez, 2012). El cuadro 27 muestra el resumen de los valores de pH, C.E, nitrógeno, fósforo disponible y materia orgánica de los suelos en los sitios donde está el género *Lupinus* y en los suelos homólogos donde no está establecido, mientras que el cuadro 28 muestra los resultados de estas variables del suelo a las dos profundidades estudiadas.

Cuadro 27. Condiciones del suelo donde se establece *Lupinus* y suelos homólogos donde no se estableció.

GÉNERO	CONDICIÓN	n	pH			C.E	NITRÓGENO		FÓSFORO		MATERIA ORGÁNICA
			ACTIVO	POTENCIAL	Δ		%	cm kg ⁻¹	ppm	cm kg ⁻¹	
			1:2			dS/m	media.				
<i>Lupinus</i>	Se estableció	72	5.4	4.6	0.7	0.08	0.5	59.1	0.2	54.5	4.0
	No se estableció	48	5.3	4.4	0.9	0.07	1.2	83.4	0.1	32.6	7.8



Cuadro 28. Condiciones del suelo donde se establece *Lupinus* según profundidad

GÉNERO	PROFUNDIDAD	pH		CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	NITRÓGENO	FÓSFORO	MATERIA ORGÁNICA				
		ACTIVO	POTENCIAL								
		1:2	Δ	dS/m	%	cm kg ⁻¹	ppm	cm kg ⁻¹	%		
	cm	n	media.								
<i>Lupinus</i>	≥ 20	79	5.4	4.6	0.8	0.07	0.7	59.1	0.2	48.4	5.5
	20 - 40	41	5.2	4.5	0.7	0.09	0.9	83.4	0.1	40.7	5.6

La disponibilidad de los nutrimentos queda influenciada por el pH, la actividad microbiana, la estructura del suelo así como otros factores entre los cuales está la relación N : P. Esta relación se muestra en el cuadro 28, en los grupos de suelo 1, 2, 3 y 4 se dio con un cociente mayor a 60 por lo que indicaría una baja disponibilidad del P, en el grupo 5 la el cociente fue menor (21.1 mg kg⁻¹) a pesar de que esto aún se vería limitada la cantidad de P en el suelo ($p \leq 0.05$).



Cuadro 29. Relaciones entre Carbono: Nitrógeno y Nitrógeno: Fósforo.

Parámetro	C : N	N : P
	%	g kg ⁻¹
GRUPO 1 (<i>Lupinus montanus</i>)		
	n	
	70	46
Máximo	113	811.3
Mínimo	4.8	12.6
Media	27.4	216.4
Moda	12.3	783.2
Mediana	18.2	102.4
Desviación estándar	22.6	279.8
GRUPO 2 (<i>Lupinus montanus</i>)		
	n	
	41	28
Máximo	40.7	153.2
Mínimo	5.9	14.2
Media	17.1	68.2
Moda	40.7	32.9
Mediana	16.3	38.7
Desviación estándar	6.9	46.2
GRUPO 3 (<i>Lupinus aschenbornii</i>)		
	n	
	28	36
Máximo	172.8	337.6
Mínimo	6.4	3.1
Media	31.3	63.9
Moda	.	84
Mediana	17.7	42.1
Desviación estándar	38.2	66
GRUPO 4 (<i>Lupinus bilineatus</i>)		
	n	
	18	16
Máximo	142	277.5
Mínimo	2.5	11.6
Media	48.5	67.4
Moda	.	.
Mediana	42.5	42.5
Desviación estándar	36.1	65.9
GRUPO 5 (<i>Lupinus elegans</i>)		
	n	
	34	27
Máximo	174.3	63.7
Mínimo	1.8	1.9
Media	37.3	21.1
Moda	46.8	5.9
Mediana	26.2	11.2
Desviación estándar	37.3	20.1



Conclusiones

Los suelos donde se estableció el género *Lupinus* son moderadamente ácidos pero ligeramente menos ácido respecto a los sitios homólogos ($p \leq 0.05$) “acondicionando” un mejor ambiente edáfico para su desarrollo. Los suelos bajo *Lupinus* son menos saturados en sales que los suelos donde no se establece ($p \leq 0.05$), además de presentar una mayor conductividad eléctrica donde crece *Lupinus* respecto a aquellos donde no está presente ($p \leq 0.05$). Aunque son poco más pobres en nitrógeno y materia orgánica, presentan mayor cantidad de fósforo disponible aquellos suelos donde se establece *Lupinus* ($p \leq 0.05$).

Los suelos donde se establecieron las colonias de *Lupinus* tienden a ser moderadamente ácidos mientras menos profundos sean, y se presentan pH menos ácidos a menos de 20 cm (5.4) comparados con los de mayor profundidad (5.2) ($p \leq 0.05$), además de ser suelos menos saturados de 0 a 20 cm (0.7 dS/m) comparado con los de más de 20 cm (0.9 dS/m), esto con una significancia estadística $p \leq 0.05$.

El contenido de nitrógeno total del suelo es pobre y se encuentra en menor cantidad en los suelos de 20 cm de espesor (59.1 cm kg⁻¹) y aumenta en los suelos bajo esta profundidad (83.4 cm kg⁻¹) con una significancia estadística de $p \leq 0.05$, al contrario de lo que sucede con el fósforo que presentó mayor acumulación por encima de los 20 cm (48.4 cm kg⁻¹) respecto al suelo más profundo (40.7 cm kg⁻¹) con una significancia de $p \leq 0.05$.

Los sitios donde se desarrollaron colonias de *Lupinus* fueron sitios, en su mayoría, perturbados por el hombre, excepto en la zona por arriba de 3800 m que son sitios de recepción de materiales. Por otra parte, los sitios donde no se encontró este género no mostraron alguna perturbación o recepción de materiales de zonas altas.

Los resultados de esta investigación permiten describir algunas propiedades que caracterizan a los suelos donde se establece *Lupinus*. Las cuatro especies que se localizaron a lo largo de un gradiente se dividieron en distintos grupos para describir las propiedades del suelo.

Los sitios donde se estableció *Lupinus* son pobres en materia orgánica, comparados con otros suelos de origen volcánico. En los suelos homólogos donde no se establecieron las colonias de *Lupinus* la cantidad de materia orgánica muestran una mayor cantidad, sin embargo, estos resultados no presentan diferencia significativa.



Existe una gran variedad de estudios que relacionan los nutrientes del suelo y la cantidad fijada en tejido foliar, sin embargo, se carece de trabajos que describan los suelos donde se establece *Lupinus* y como se asimila y fija el nitrógeno, además de otros elementos, en el tejido foliar.

Lupinus es una leguminosa que fija nitrógeno en sus tejidos. Las colonias de *Lupinus* que se establecieron en los sitios estudiados fijaron mayor porcentaje de nitrógeno, principalmente en las flores, comparado con las plantas que se establecieron en los mismos sitios que estas (*Penstemon gentianoides*, *Eryngium monocephalum*, *Conyza bonariensis*, *Festuca* sp., *Zea mays*, *Bothriochloa* sp., *Salvia divinorum*, *S. chartaceum*).



Referencias

- Alcántara, G., & Trejo-Téllez L. 2009. Nutrición de cultivos. México. Mundi-Prensa. ISBN 978-968-7462-48-6
- Álvarez, N., Oria de la Rueda, J.A. 2004. Las riberas: síntesis de la ecología de un ecosistema singular. Universidad de Valladolid.
- Arnold, R.W., Szabolcs, I., Targulian, V.O. 1990. Global Soil Change. International Institute for Applied System Analysis. Luxemburgo, Austria. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/3458/1/CP-90-002.pdf>
- Astier, C., Etchevers, J., Maass, M.. 2002. Derivaciones de indicadores de la calidad del suelo en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencias*. 36(5). ISSN: 1405-3195. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30236511.pdf>
- Ayala, M. Y. 2011. Interacción ecológica del susrema agua-sueo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Azcón-Bieto, J., Talón M.. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2ed. Mc Graw Hill Education. Universitat de Barcelona, España.
- Baca B. E., Soto, L., Pardo Ma. P.. 2000. Fijación biológica del nitrógeno. Elementos: Ciencia y Cultura 7(038). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla. 43-49 <https://www.redalyc.org/pdf/294/29403808.pdf>
- Barbazan, M., Ferrando, M., Zamalvide, J. 2007. *Estado nutricional de Lotus corniculatus L.* *Agrociencias*. Uruguay. 11(1) 22-34.
- Barrera, E. D. 2015. Evaluación del frijol *Lupinus (Lupinus mutabilis)* como abono verde para la producción agroecológica en el municipio de Subachoque, Cundinamarca. Tesis para obtener el grado de Ingeniero agrónomo. Corporación Universitaria Minuto de Dios. Facultad de Ingeniería. Bogotá. https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/3340/1/TIAG_BarreraCastnedaEysi_2015.pdf
- Barrientos, D., Montenegro, L., Pino, A., 2002. Evaluación de fijación simbiótica de nitrógeno en *Lupinus albus* y *Lupinus angustifolius* en un Andisol vilcun del sur de Chile. *Chapingo, México. Terra Latinoamericana*. 20(1) 39-44 <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320107.pdf>
- Bautista, A., Etchevers, B., del Castillo R.F., Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2): 90-97. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=149>
- Becerra, M.G. 2018. De Parque Nacional a Reserva de la Biosfera. Historia biocultural de la Sierra Nevada de México. México. https://ceiba.org.mx/publicaciones/ANP/2018_Sierra.Nevada_Hist.Biocult_gbecerra.pdf
- Becerra, A. 1998. Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿utopía o posibilidad en México? *Terra Latinoamericana*, 16(2),0. Consulta 6 de Julio de 2021. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316209>
- Bermúdez-Torres, K., Ferval, M., & Legal, L.. 2015. *Lupinus* species in central Mexico in the era of climate change: Adaptation, migration, or extinction? *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems*. pp. 215-228. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_8
- Buol, S. W., Hole, F. D., McCracken, R. J., & Southard, R. J. (1997) Soil genesis and classification 4th ed. Ames, IA: Iowa State University Press.
- Cairo, P.. 1995. La fertilidad física del suelo y la Agricultura Orgánica en el Trópico. Universidad Agraria. UNA, Managua, Nicaragua. 228p.
- Cardona, W. 2017. Requerimientos nutricionales (nitrógeno, fósforo, potasio y calcio) en etapa vegetativa y reproductiva de un cultivo de mora (*Rubus glaucus* Benth.), ubicado en el municipio de Silvania (Cundinamarca). Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59275>
- Carter E.B., Theodorou, M., Morris P. 1999. Responses of *Lotus corniculatus* to environmental change. Effect of elevated CO2, temperature and drought on tissue digestion in relation to condensed tannin and carbohydrate accumulation. *Journal of science of Food and Agriculture* 79(11): 1431-1440
- Castillo, C., M.. 2005. Selección y calibración de indicadores locales y técnicos para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la micro cuenca Cusamá el Tuma- La Dalia Matagalpa. Trabajo de diploma. Universidad Agraria. Nicaragua. <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnp35c352.pdf>
- Castillo, M. V. 2004. Estrategia Temática para la Protección de Suelos de la Unión Europea. *Ecosistemas*. Murcia, España. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=17>
- Celaya-Michel, H., Castellanos Villegas, A. E. 2011. Mineralización del nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*. 29(3) 343-356 <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321283013.pdf>
- Centeno, M. F. (s. f.). Fertilidad de Suelo - Fertilab. https://www.fertilab.com.mx/Laboratorio/Nutricion/Analisis-de-fertilidad-de-suelo?gclid=Cj0KCQIAgQefBhDgARIsAMhgXA6V1TKP-WdSntQlp9MWGr1E0PFcNB3EXh2J-38K4VpOnSONE6aoPKAaAps7EALw_wcB
- CIMMYT, International Maize and Wheat Improvement Center. 2020. Agricultura para la paz: un llamado a la acción para evitar una crisis alimentaria mundial. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-nitrogeno-en-la-agricultura/>
- CIMMYT, International Maize and Wheat Improvement Center. 2020. El nitrógeno en la agricultura. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/el-nitrogeno-en-la-agricultura/>
- Colli, P. 2015. Actividad arilsulfatasa y Ureasa en la fertilidad de los suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad . Asteraceae = Compositae, *Conyza bonariensis* (L.) Cronq. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/conyza-bonariensis/fichas/ficha.htm>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2011. Asteraceae = Compositae, *Gnaphalium chartaceum* Greenm. = *Pseudognaphalium chartaceum*. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/gnaphalium-chartaceum/fichas/ficha.htm>
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Protegidas. 2013. Programa de Manejo Parque Nacional Iztacchuatl Popocatepetl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Cornejo, C. 2019. Cuantiación de aluminio y hierro en suelos de origen volcánico en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo. (Tesis de Licenciatura) Fes Zaragoza, UNAM
- Correndo A. A., y García F.. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. https://www.researchgate.net/publication/313856965_Concentracion_de_nutrientes_en_planta_como_herramienta_de_diagnostico
- Cotler H., Garrido A. Bunge V. Cuevas M. 2010. Las cuencas hidrográficas de México: priorización y toma de decisiones. En: *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.* (H. Cloter, Ed.). Instituto Nacional de Ecología/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., Ciudad de México, México, pp.115-120
- Cruz, A. 1994. Suelos y su génesis. Colección agricultura tropical. Editorial Dirección de Centros Regionales. Chapingo, México. pág 22-24
- Cruz-Flores, G. 2006. Ecología del suelo. Un enfoque hacia la nutrición mineral de plantas superiores. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. UNAM
- Cruz-Flores, G. y Guerra-Hernández, E. A. 2017. Ecosistemas ribereños de montaña: descripción y estudio. UNAM, FES Zaragoza. https://www.researchgate.net/profile/Eliane-Ceccon/publication/321886568_CAPITULO_VII_RESILIENCIA_RESISTENCIA_ELASTICIDAD_Y_FRAGILIDAD_DE_LOS_ECOSISTEMAS_RIBERENOS



_DE_MONTANA/links/5a3d2a9b458515f6b039a27f/CAPITULO-VII-RESILIENCIA-RESISTENCIA-ELASTICIDAD-Y-FRAGILIDAD-DE-LOS-ECOSISTEMAS-RIBERENOS-DE-MONTANA.pdf

- Cruz-Flores, G., Guerra-Hernández, E. A., Valderrábano-Gómez, J. M., Campos-Alves, J. 2020. Indicadores de calidad de suelos en bosques templados de la Reserva de la Biosfera los Volcanes, México. *Terra Latinoamericana* 38:4 781-793.
- Cruz-Flores G., López-López A. B. 2015. Redescubriendo el suelo: importancia ecológica y agrícola. Ciudad de México, México. FES-Zaragoza, UNAM y CONACyT. Ciudad de México, México.
- Cruz-Flores G.; E., Suastegui-Méndez; E. Ángeles-Cervantes. 2009. Hidrólisis de N-orgánico y liberación de NH₄⁺ mediante actividad ureasa en suelos forestales de Áreas Naturales Protegidas. Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. S.L.P. RFO1507e-6
- Delgado, R., Nuñez, M. C., Velásquez L. 2004. Acumulación de materia seca, absorción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio por el maíz en diferentes condiciones de manejo de la Fertilización Nitrogenada. v.54, n.4.. *Agronomía Tropical*. ISSN 0002-192X
- Diaz, J., L. 2014. *Salvia divinorum*: enigma psicofarmacológico y resucio mente-cuerpo. *Salud Ment* vol.37 no.3 México. ISSN 01853325 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33252014000300002
- Dignino, J. 2014. Análisis de varianza. *Bioestadística y Epidemiología*. Pontificia Universidad Católica de Chile. 43: 306-310. <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
- DOF, Diario Oficial de la Federación. 1980. Norma Oficial Mexicana NOM-F-68-S-1980 Alimentos Determinación de Proteínas. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4858024&fecha=04/08/1980#gsc.tab=0
- DOF, Diario Oficial de la Federación. 2007. Programa de ordenamiento ecológico regional del volcán Popocatepetl y su zona de Influencia. https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_conagua/Archivos%20de%20la%20SEMARNAT/Ordenamiento%20Ecologico/Ordenamiento-Volcan%20del%20Popocatepetl%202007.pdf
- DOF, Diario oficial de la Federación. 2002. NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2000. Que establece las especificaciones, fertilidad, salinidad y fertilidad de los suelos. Estudios, muestreos y análisis. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Dolman, A., J. 2019. *Biogeochemical cycles and climate*. Oxford: Oxford University Press. ISBN 9780191824388. <https://oxford-universitypressscholarship-com.pbidi.unam.mx:2443/view/10.1093/oso/9780198779308.001.0001/oso-9780198779308-chapter-1>
- Dominguez, B. 2011. Levantamiento nutricional en *Abies religiosa* a lo largo de un ciclo anual en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Dominguez, M., Nieto, A., Marin, J.C., Keck, A.S., Jeffrey, E., Céspedes C.L. 2005. Antioxidant Activities of Extracts from *Barkleyanthus salicifolius* (Asteraceae) and *Penstemon gentianoides* (Scrophulariaceae)†. *Jurnal of agricultural and food chemistry*. DOI: 10.1021/jf0504972
- Dontsova, K., Balogh-Brunstand, Z. & Le Roux, G. 2020. *Biogeochemical cycles: Ecological Drivers and Environmental Impact*. Washington: Wiley.
- Doran, J.W., Jones, A. J., Arshad, M.A., Lowery, B & Grossman, B. 1996. *Physical Test for Monitoring Soil Quality*. SSSA Special Publication. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>
- Doran, J.W., y Parkin, T. B.. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. En: *Defining soil quality for a sustainable environment*. 3-33 p. Madison, Wisconsin, USA: Soil Special Publication. Núm 35.
- Espinoza-Barrera L. & Chávez-Sahagún E. 2019. El otro genoma de las plantas: los cloroplastos y su ADN. Desde el Herbario CICY 11:202-206. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. ISSN: 2395-8790
- Esteve, P. & Jaén, M. 2012. El estudio de los ciclos biogeoquímicos en el estudio de los problemas ambientales en Educación Secundaria. *Investigación didáctica*. ISSN: 0213-7771. 77-88
- Etchevers, J. D., A. Trinidad S., Guerrero M., A. Pérez G., D. García L. y G. Morfin R. 1985. Levantamiento nutricional del maíz en la Sierra Tarasca de Michoacán. *Agrociencia* 60: 143-154
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2022. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/land-and-soils/es/>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura. 2022. Portal de Suelo de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/evaluacion-de-los-indicadores-globales-de-la-salud-del-suelo/salud-del-suelo-fisica/es/>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2021. El suelo está en peligro pero la degradación puede revertirse. <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2021. Mapeo de los suelos afectados por salinidad. Mapa GSS. Especificaciones técnicas y directrices para los países. <https://www.fao.org/3/ca9203es/ca9203es.pdf>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2021. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2019. Portal de suelos de la FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación.2017. *CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO: el potencial oculto*. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/i6937s/i6937s.pdf>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2015. *Understanding Mountain Soil: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015*. Roma, Italia. Pág. 137.
- Fernández, M., T. 2007. Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA Sobre los derivados de caña y azúcar*. Ciudad de la Habana, Cuba. 16(2). 51-57. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>
- Figueroa, M.L., Martínez C.A., Ortiz, C.A. 2018. Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 36: 287-299. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>
- Gamarra, C. C., Díaz, M. I., Galeano, M. del P., Cabrera, A. J. N.. 2017. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastores del Chaco paraguay. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* (9)46. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- García, Y., Ramírez, W., Sánchez, S. 2012. Soil quality indicators: a new way to evaluate this resource. *Pastos y forrajes*. 35(2): 125-135. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- González-Sama, A., Coba, T., Redondo, F. J., Nuria de, L., Fedorova, E. E., Lorenzo, C., Hernández-Jiménez, M. J., Pozuelo, J. M., Golvano, M. P., Felipe, M. R., Pueyo, J. J., Fernández-Pascual, M., Lucas, M. M. 2006. Características especiales de la simbiosis de *Lupinus-Bradyrhizobium* sp. (*Lupinus*) 182-193. Centro de Ciencias Medioambientales, C.S.I.C., Madrid. <http://hdl.handle.net/10261/27443>
- Guerra, E. 2020. Indicadores hídrico-edáfico de a calidad para ambientes ribereños de la Reserva de la Biosfera "Los Volcanes". Tesis de doctorado. Instituto de Geografía, UNAM.
- Hernández, G. 2020. Abundancia de bacterias de los géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* en los suelos ribereños y su relación con sus contenidos de nitrógeno total en un gradiente altitudinal de la Reserva de la Biosfera de los Volcanes. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Hernández R., Fernández C. & Baptista P.. 2014. Metodología de la investigación. Pág 304-305. México D.F: Mc Graw Hill Education.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información. 2012. Siglo XXI, ¿La era de la explosión demográfica, de centenarios y de los nuevos Matusalén?. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*.



- IUSS Working Group WRB.. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.
- Jiang, W., Gong, L., Yang, L., He, S., Xiaohu, L. 2021. Dynamics in C, N and P stoichiometry and microbial biomass following soil depth and vegetation types in low mountain and hill region of China. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-99075-5.pdf>
- Macot, E. 2013. Azufre en el sistema agua-sedimento-suelo para ambientes ribereños asociados a diferentes condiciones de uso de suelo. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. Londres.
- Martínez, S.. 2012. Actividad enzimática de suelos ribereños del Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Megias, M., Molist, P., Pombal M.A.. 2018. Atlas de Histología Vegetal y Animal: Órganos vegetales, RAÍZ. *Textstudios*. <https://mmegias.webs.uvigo.es/descargas/o-v-raiz.pdf>
- Mengel, K., Kirkby, E.A. 2000. Principios de nutrición vegetal. Internacional Potash Institute. Basel, Suiza. <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/64-principios-de-nutricion-vegetal.pdf>
- Monsalve-Camacho, O. I., Gutiérrez-D, J. S., Cardona, W. A. 2017. Factores que intervienen en los procesos de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 11:1 http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732017000100200
- Moravex, B., Chorover, J. 2020. Critical Zone Biogeochemistry: Linking Structure and Function. En Dontsova, K., Balogh-Brunstad, Z. & Le Roux G. (Eds.), *Biogeochemical Cycles* (pp. 133-135) Wiley Global Headquarters.
- Naiman, R. J., Scott J., Drake. D. C., Latterell, J. J., O'Keefe, T. C., Bailán., E. V. 2005. Origen, Patterns, and importance of Heterogeneity in Riparian System. The Ecosystem Center, Marine Biological Laboratory, USA. https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-24091-8_14
- Norori, A., U. 2014. Diagnóstico del estado nutricional de los suelos en sistemas productivos de café (*Coffea arabica* L.), maíz (*Zea Mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), en la comunidad de Santa Julia, En el cruceo, Managua, 2014. Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Agraria. Repositorio institucional, UNA. <http://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/3159>
- Ochoa, V., Hinojosa B., Gómez-Muñoz, B., García-Ruiz R.. 2007. Actividades enzimáticas como indicadores de la calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Revista de inicio a la investigación Universidad de Jaén*. https://www.researchgate.net/publication/232607805_Actividades_enzimaticas_como_indicadores_de_calidad_del_suelo_en_agroecosistemas_ecologicos
- Osorio, N.W.. 2012. El análisis foliar: una poderosa herramienta para diagnosticar el estado nutricional de los cultivos, pasturas y plantaciones. *Manejo integral del suelo y nutrición vegetal*. 1(3) 1-4. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/Analisis-foliar.pdf>
- Pérez, Y. (2017) Contenidos de azufre en diferentes componentes del ambiente en un sistema fluvial del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia en la cuenca Alta del Balsas. Informe de servicio social. FES Zaragoza, UNAM.
- Porta, L., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª ed. Mundi-Prensa. Madrid. 960 pp.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch. 2011. *Introducción a la edafología. Uso y protección*. 2da Ed. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 535 pp
- Ramírez, R.. 1997. Propiedades, físicas, químicas, biológicas del suelo. Convenio Fenalce-SENAC. Santafé, Bogotá. <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6636/1/083.pdf>
- Rincón, L. E. & Gutiérrez, F. A. 2012. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colomb. Biotecnol.* XIV (1). 285-295.
- Romero, F. I., Cozano, M. A., Gangas R. A., Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile. Santiago, Chile. *Bosques*. 35(1) 3-12 <https://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v35n1/art01.pdf>
- Roy-Bolduc & Hijri, M. 2011. The use of mycorrhizae to enhance phosphorus uptake: a way out thephosphorus crisis. *Biofertil Biopestici. DOI: 10.4172/2155-6202.1000104*. https://www.researchgate.net/publication/280294294_The_Use_of_Mycorrhizae_to_Enhance_Phosphorus_Uptake_A_Way_Out_the_Phosphorus_Crisis
- Rucks, L., García, F., Káplan, A., Ponce de León, J., Hill., 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Rubiano, Y., Amézquita E., y Beaulieu, N.. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad de suelo para Llanos Orientales de Colombia. Estudio de caso: Municipio de Puerto López Meta. *Acta Agronómica*. 54(3) <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169920338001.pdf>
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México
- Sandoval, J.C. 2016. Caracterización y clasificación de los suelos del sistema ribereño del Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Sandoval, J.C. 2020. Catenas de suelos ribereños del Iztaccíhuatl bajo diferentes tipos de vegetación: origen y captura de carbono. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados.
- Santiago, I. 2018. Contenido de carbono orgánico y su comportamiento en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Sharma, M. K., & Kumar, P. 2011. Guía para la identificación y manejo de la deficiencia de nutrientes en cereales. Instituto Internacional de Nutrición Vegetal. EUA. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batán, México. 50p. ISBN: 9780-0-96295998-9-9
- SQL. Soil Quality Institute. Indicators for soil quality evaluation. 2001. *Soil Quality- Introduction*. USDA Natural Resources conservation service. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052207.pdf
- Torres, J., Sánchez, J. D., Cayón, D. G.. 2017. Nutrient accumulation models on the banana (*Mousa AAA Simmonds cv. Williams*) plant under nitrogen doses. *Acta Agronómica*. 66(3), 391-369 Doi: 10.15446/acag.v66n3.58238
- USDA, United State Department of Agriculture. 2008. Aggregate Stability. Soil Quality Indicators. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- USDA, United State Department of Agriculture. 2011. Soil pH. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- USDA, United State Deparment of Agriculture. 2022. Soil and Soil Survey. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054251
- Soriano, M., D.. 2018. pH del Suelo. Universidad politécnica de Valencia. Departamento Centro Producción Vegetal Universitat Politècnica de València. <https://docplayer.es/108658496-Ph-del-suelo-apellidos-nombre-soriano-soto-maria-desamparados-1-departamento-universitat-politecnica-de-valencia.html>
- Steinmann, V. W., Ramírez-Amezcuza, Y., Arredondo-Amezcuza, L. y R. A., Hernández-Cárdenas. (2017). Flora Alpina del Centro de México. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío. Informe final-SNIB-CONABIO proyecto JF076. Ciudad de México.



- Street, L.E., Mielke, N., & Woodin, S.J. (2017). Phosphorus availability determines the response of tundra ecosystem carbon stocks to nitrogen enrichment. *Ecosystems*, 21(6), 1155–1167. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s10021-017-0209-x>
- Suastegui, E. 2019. Contribución de la actividad de la ureasa a la liberación del nitrógeno en suelos de uso agrícola y forestal. Tesis de licenciatura. FES, Zaragoza, UNAM.
- Valencia, I. C. y Hernández, B.A.. 2002. Muestreo de suelos, preparación de muestra y guía de campo. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México D.F. 131 p.
- Valderrábano, J. M.. 2013. Calidad del suelo forestal y su distribución espacial en bosques de coníferas del Parque Nacional Iztapopo. Tesis de Maestría. Instituto de Geografía, UNAM.
- Verhulst, N., Francois, I., Grahmann, K., Cox, R., Govaerts, B. 2015. Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. CIMMYT. México
- Zamora-Natera, J. F., Zapata-Hernández I., Villalvazo-Hernández, A. 2019. Fijación biológica del nitrógeno en tres especies del género *Lupinus* (Leguminosae, Papilionoideae) en México. *Acta Botánica Mexicana*. 126(2019) <https://abm.ojs.inacol.mx/index.php/abm/article/view/1543>
- Zapata, R., Rodríguez, P. M. García, E., Salcedo A. H., Lara, J. F., Zamora, N. 2019. Dry matter yield and nitrogen content in *Lupinus* spp. (Leguminosae) with potential as a green manure. *Agricultural Research Communication Centre*. Print ISSN:0250-5371 / Online ISSN:0976-057



ANEXOS

Anexo 1. Ejemplares para la determinación de *Lupinus*.

	Sitio:	La Joya		
	Altitud (m s.n.m.):	3890	Estación:	Otoño
	Coordenadas UTM (m):	536940 W	2116534 N	
	Fecha:	9 - agosto- 2019		
	Especie:	<i>Lupinus</i>	<i>montanus</i>	
	Colectó:	González-Ruiz, S.	Cruz-Flores, G.	
	Determinó:	Bermúdez-Torres, K.		
	Observaciones:	Plantas de 60 a 80 cm de 8 a 13 floraciones de 16 a 20 cm y de 30 a 37 tallos, hojas de 5 a 10 cm palmadas color verde con manchas amarillas, peciolos de 5 a 6 cm. Se encontró la colonia en una zona con materiales coluviales de forma cóncava, situada entre humedales.		

	Sitio:	Paso de Cortés		
	Altitud (m s.n.m.):	3762	Estación:	Otoño
	Coordenadas UTM (m):	539303.2 W	2113118 N	
	Fecha:	Agosto- 2019		
	Especie:	<i>Lupinus</i>	<i>montanus</i>	
	Colectó:	González-Ruiz, S.	Cruz-Flores, G.	
	Determinó:	Bermúdez-Torres, K.		
	Observaciones:	Plantas de 170 cm de alto con 3 a 8 tallos por individuo, de 2 a 3 inflorescencias, hojas de 6 a 12 cm palmadas color verde y manchas amarillas, peciolos de 5 a 8 cm. Se encontró la colonia en el claro del sol en una zona perturbada junto al camino que conecta a la zona alta del PNI-P.		

	Sitio:	Cascada Buenavista		
	Altitud (m s.n.m.):	3637	Estación:	Otoño
	Coordenadas UTM (m):	539303.2 W	2113118 N	
	Fecha:	Septiembre- 2019		
	Especie:	<i>Lupinus</i>	<i>aschenbornii</i>	
	Colectó:	González-Ruiz, S.	Cruz-Flores, G.	
	Determinó:	Bermúdez-Torres, K.		
	Observaciones:	Plantas de 40 a 50 cm de altura de 1 a 2 inflorescencias, hojas de 2 a 5 cm palmadas color verde y en buen estado y peciolos de 4 a 6 cm. Se encontró una colonia en una zona perturbada junto a un río en el claro de sol.		



	Sitio:	Potrero		
	Altitud (m s.n.m.):	3000	Estación:	Primavera
	Coordenadas UTM (m):	530530 W	2109428 N	
	Fecha:	Abril 2022		
	Especie:	<i>Lupinus</i>	<i>bilineatus</i>	
	Colectó:	González-Ruiz, S.	Cruz-Flores, G.	
	Determinó:	Bermúdez-Torres, K.		
	Observaciones:	Plantas de 70 a 80 cm de alto, de 12 a 15 inflorescencias, hojas palmadas color verde y en buen estado de 5 a 7 cm y peciolos de 4 a 6 cm. Se encontró una colonia en floración en una zona agrícola con rastrojo de maíz.		

	Sitio:	Xalitzintla		
	Altitud (m s.n.m.):	2980	Estación:	Otoño
	Coordenadas UTM (m):	546935 W	2109694 N	
	Fecha:	Octubre-2019		
	Especie:	<i>Lupinus</i>	<i>elegans</i>	
	Colectó:	González-Ruiz, S.	Cruz-Flores, G.	
	Determinó:	Bermúdez-Torres, K.		
	Observaciones:	Plantas de 1.5 a 2.5 m de altura, presentan inflorescencias en la parte apical de la planta, hojas palmadas de 2 a 5 cm color verde y en buen estado, de peciolos de 3 a 6 cm. Se encontró una colonia en el claro de sol de una zona perturbada por extracción minera y la agricultura en un talud junto al camino.		



ANEXO 2

Descripción de los suelos reportados con el establecimiento de *Lupinus*

El raciocinio del ANOVA tiene su fundamento en la hipótesis nula que habla de que no existen diferencias significativas entre las variables estudiadas, lo que quiere decir que los tratamientos o muestras provienen de la misma población y, la hipótesis alterna que se entiende como que en al menos dos tratamientos existe diferencia (Dignino, 2014).

Cuadro 30. Resumen del ANOVA para los suelos donde se establece el género *Lupinus* en los suelos tipo.

VARIABLE	G.L	Σ DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	F	P-VALUE ≤ 0.05
pH activo	7	57.5	8.2	184.4	**
pH potencial	7	42.9	6.1	74.2	**
Δ pH	7	3.8	0.5	8.3	**
Conductividad eléctrica	7	0.1	0.1	14.7	**
Nitrógeno total en suelo %	7	69.0	9.9	25.4	**
Nitrógeno total en suelo cm kg	7	562941.6	80420.2	6.2	**
Fósforo disponible en el suelo ppm	7	3.9	0.6	94.7	**
Materia orgánica en el suelo %	7	2437.4	348.2	14.4	**

Cuadro 31. Resumen de los ANOVA de los suelos reportados en la literatura.

Variable	g.l	Σ de cuadrados	Media cuadrática	F	P-value ≤ 0.05
pH activo (H ₂ O 1:2)	54	41.9	0.7	7.94	**
pH potencial (CaCl ₂)	15	12.3	0.8	5.01	**
pH potencial (KCl)	24	6.7	0.2	1.95	n.s
Δ pH (CaCl ₂)	16	1.6	0.09	1.84	n.s
Δ pH (KCl)	23	4.8	2.06	9.90	**
Δ pH (CaCl ₂ + KCl)	39	6.4	0.1	3.94	**
Materia orgánica %	47	1888.9	40.2	1.50	n.s
Carbono orgánico del suelo	54	642.86	11.9	1.43	n.s
Nitrógeno en suelo %	45	2.0	0.05	2.19	**
Nitrógeno en el suelo g	45	210.8	4.6	2.45	**
Fósforo disponible en suelo (ppm)	38	1.87	0.05	11.91	**
Fósforo disponible en suelo mg Kg	38	402362.4	10588.5	20.89	**
Conductividad eléctrica	43	0.3	0.007	1.04	n.s
Relación C/N en suelo	44	34200.4	777.3	2.97	**
Relación N/P en suelo	30	2234576.9	74485.9	43.54	**
Densidad aparente	48	13.7	0.2	5.50	**
Humedad %	16	8616.7	538.5	5.09	**
Espacio poroso %	27	18444.5	683.1	3.20	**
Arcillas %	38	1083.4	28.5	9.14	**
Limo %	38	3420.0	90.0	3.91	**
Arena %	38	17888.4	470.7	16.35	**



Anexo 3

Cuadro 32. Resumen de los análisis GLM para las diferentes variables de planta.

VARIABLE	G.L	Σ DE CUADRADOS	MEDIA CUADRÁTICA	F	P-VALUE \leq 0.05
Peso fresco planta g	5	237069.9	47413.9	20.71	**
Peso seco planta g	5	5226375.2	1045275.0	16.54	**
Peso seco en flor g	4	28511.2	7127.8	22.01	**
Peso seco en hojas g	5	828514.9	1657702.9	15.82	**
Peso seco en tallos g	5	1516725.2	303345.0	15.43	**
Peso seco total por individuo g	5	5232572.0	1046514.4	16.60	**
Total de humedad %	5	5958.7	1191.7	33.33	**
N-total en flor	4	84.3	21.0	21.07	**
N-total en hoja	5	707.2	141.4	20.80	**
N-total en tallo	5	212.4	42.5	13.58	**
N-total en vaina	2	552031.5	276015.8	147.1	**
N-total en raíz	3	416.1	138.7	19.2	**
N-total por individuo	5	313397.8	62679.6	432.1	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno en flor g kg ⁻¹	4	3610.8	902.7	1888.11	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno en hoja g kg ⁻¹	5	1284.5	256.9	20.51	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno en tallo g kg ⁻¹	5	2104077.4	420815.5	111.5	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno en vaina g kg ⁻¹	1	26944.5	2694.5	102.9	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno en raíz g kg ⁻¹	3	41974.7	13991.6	305.4	**
Eficiencia de Uso de Nitrógeno por individuo g kg ⁻¹	5	11014.8	2202.9	72.3	**
Acumulación de fósforo en flores g kg ⁻¹	4	48.63	12.2	93.8	**