



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

ESTACIÓN REGIONAL DEL NOROESTE

LIMITANTES ECOLÓGICAS EN EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTAS
EN LOS JALES ABANDONADOS DE NACOZARI, SONORA

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A

LAURA VERÓNICA ARVIZU VALENZUELA

TUTOR PRINCIPAL

DR. FRANCISCO ELIZANDRO MOLINA FREANER
(INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM)

COMITÉ TUTOR

DRA. MARÍA DEL ROCÍO CRUZ ORTEGA
(INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM)

DRA. DIANA MEZA FIGUEROA
(DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, UNISON)

HERMOSILLO, SONORA, SEPTIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

*A mi pequeña y
gran familia*

AGRADECIMIENTOS

Al **Posgrado en Ciencias de la Tierra** de la **Universidad Nacional Autónoma de México**.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la beca otorgada para los estudios de Maestría en **Ciencias de la Tierra**.

A los proyectos: a) **Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (DGAPA-PAPIIT-IN209015)** de la **UNAM**, y b) **University of Arizona-Universidad Nacional Autónoma de México Consortium on Drylands Research**, por su apoyo financiero para la realización de este trabajo de investigación.

A mi director de tesis, el **Dr. Francisco Molina Freaner**, por su apoyo incondicional en mi camino en el Posgrado en Ciencias de la Tierra.

A la **Dra. Ma. Rocío de la Cruz Ortega** y la **Dra. Diana Meza Figueroa**, por formar parte de mi Comité Tutor, asesorías y recomendaciones en mi proyecto de tesis.

A los miembros de mi Jurado Evaluador: la **Dra. Silke Cram Heydrich**, la **Dra. Pilar Ortega Larrocea**, el **Dr. René Loredó Portales** y la **Dra. Diana Meza Figueroa**, por su apoyo en la revisión y enriquecimiento de este trabajo.

Un agradecimiento especial para la **Dra. Lucy Mora Natividad** y el **Dr. Bruno Chávez Vergara** del Depto. de Ciencias Ambientales y de Suelo del Instituto de Geología-UNAM, por su accesibilidad para la realización del experimental de Mineralización de carbono, así como su gran apoyo y asesorías.

Al **Dr. Agustín Gómez Álvarez** del Depto. de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, por su accesibilidad al equipo de Horno de Microondas y su asesoría en el análisis de las concentraciones de metales de las muestras.

A la **Dra. Diana Meza Figueroa** del Depto. de Geología de la Universidad de Sonora por su accesibilidad al equipo de ICP-OE.

A **José Martínez Rodríguez**, técnico académico del Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional del Instituto de Ecología de la UNAM, por su gran apoyo y disposición en campo.

A **Pablo Sechslingloff**, por su apoyo en el trabajo de campo.

Finalmente, agradezco inmensamente a las personas que han sido sinónimo de apoyo, compañerismo, alegría y sonrisas en este andar, **mis padres, hermanos**, múltiples miembros de la **familia Hinojo, amigos**, y a mi nueva y **pequeña familia**.

CONTENIDO

I.	RESUMEN	9
II.	INTRODUCCIÓN	13
III.	MARCO TEÓRICO	16
3.1.	Generación de jales y depósitos de jales	16
3.2.	Características de los jales	17
3.3.	Preocupación ambiental de los jales.....	21
3.3.1.	Dispersión de los contaminantes de los jales (DAM y sales eflorescentes)	21
3.3.2.	Metales: Características y problemas relacionados con la salud humana	22
3.4.	Estrategias para mitigar la dispersión de contaminantes de los jales	25
3.4.1.	Fitorremediación	26
3.4.1.1.	Limitantes del sustrato en el establecimiento de plantas.....	27
3.4.1.2.	Uso de composta en la fitorremediación	28
IV.	JUSTIFICACIÓN	30
V.	OBJETIVOS	31
5.1.	Objetivo general.....	31
5.2.	Objetivos particulares	31
VI.	HIPÓTESIS	32
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
7.1.	Área de estudio	33
7.2.	Análisis de materia orgánica y nutrientes en áreas con vegetación y desprovistas de vegetación en el depósito de jales	34
7.2.1.	Colecta y preparación de muestras.....	34
7.2.2.	Análisis de materia orgánica y nutrientes	36
7.3.	Diseño de experimentos con adición de composta	36
7.3.1.	Composta	37
7.3.1.1.	Proceso de compostaje	37
7.3.1.2.	Método de elaboración de la composta	41
7.3.2.	Elaboración de la composta	41
7.3.3.	Experimento bajo condiciones controladas	44
7.3.4.	Experimento bajo condiciones de campo	45
7.4.	Evaluación de germinación y establecimiento de especies vegetales utilizadas en los experimentos	47
7.5.	Evaluación de la respuesta de las plantas establecidas en ambos experimentos	48
7.6.	Evaluación del efecto de los tratamientos experimentales y las plantas establecidas en parámetros químicos y biológicos	49
7.6.1.	Colecta y preparación de muestras.....	49
7.6.2.	Análisis de pH y Conductividad Eléctrica.....	50
7.6.3.	Análisis de actividad microbiana en el sustrato	51
7.6.4.	Análisis de metales en el sustrato y en el tejido vegetal.....	52
7.6.4.1.	Máximos Niveles Tolerables (MNT)	55
7.6.4.2.	Evaluación del factor de acumulación.....	55
7.7.	Análisis estadístico	56
VIII.	RESULTADOS	58

8.1.	Materia orgánica del suelo y nutrientes en áreas con vegetación y desprovistas de vegetación en el depósito de jales.	58
8.2.	Germinación y establecimiento de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en los diferentes tratamientos de los experimentos.....	60
8.2.1.	Experimento bajo condiciones controladas	60
8.2.2.	Experimento bajo condiciones de campo	60
8.3.	Respuesta de las plantas establecidas en los diferentes tratamientos de los experimentos... ..	62
8.3.1.	Experimento bajo condiciones controladas	62
8.3.2.	Experimento bajo condiciones de campo	63
8.4.	Efecto de la adición de composta en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los jales.	66
8.4.1.	pH	66
8.4.2.	Conductividad eléctrica (CE)	66
8.4.3.	Actividad microbiana en el sustrato.....	68
8.5.	Metales en sustrato y en tejido vegetal.....	70
8.5.1.	Experimento bajo condiciones controladas	70
8.5.1.1.	Metales en la rizósfera	71
8.5.1.2.	Metales en el tejido vegetal	72
8.5.1.3.	Máximos niveles tolerables de metales	73
8.5.1.4.	Factor de acumulación	73
8.5.2.	Experimento bajo condiciones de campo	74
8.5.2.1.	Metales en la rizósfera	75
8.5.2.2.	Metales en el tejido vegetal y Máximos niveles tolerables de metales	76
8.5.2.3.	Factor de acumulación	77
IX.	DISCUSIÓN	79
9.1.	Limitantes ecológicas de la vegetación y las especies de estudio en los jales de Nacozari.....	79
9.2.	Efecto de la composta y las especies de plantas en variables abióticas y bióticas de los jales	81
9.3.	Potencial fitoestabilizador de las especies.....	83
X.	CONCLUSIÓN	86
XI.	RECOMENDACIONES	87
XII.	ANEXOS	88
	Anexo I. Carbono total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).....	88
	Anexo II. Carbono total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).	88
	Anexo III. Nitrógeno total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).	89
	Anexo IV. Nitrógeno total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).	89
	Anexo V. Fósforo disponible (mg/Kg) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).	89

Anexo VI. Fósforo disponible (mg/Kg) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).	90
Anexo VII. Respuesta de <i>A. farnesiana</i> : biomasa y otros parámetros bajo condiciones controladas, en los diferentes tratamientos con concentración de composta.	90
Anexo VIII. Respuesta de <i>P. velutina</i> : biomasa y otros parámetros bajo condiciones controladas, en los diferentes tratamientos con concentración de composta.	91
Anexo IX. Comparación de la respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 0 % composta y 100 % jal bajo condiciones controladas.	91
Anexo X. Comparación de la respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 2.5 % composta y 97.5 % jal bajo condiciones controladas.	92
Anexo XI. Comparación de la respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 5 % composta y 95 % jal bajo condiciones controladas.	92
Anexo XII. Comparación de la respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 10 % composta y 90 % jal bajo condiciones controladas.	93
Anexo XIII. Respuesta de <i>A. farnesiana</i> : biomasa y otros parámetros bajo condiciones de campo, en los diferentes tratamientos con concentración de composta. En el tratamiento 0 % no se registraron datos debido al nulo establecimiento.	93
Anexo XIV. Respuesta de <i>P. velutina</i> : biomasa y otros parámetros bajo condiciones de campo, en los diferentes tratamientos con concentración de composta.	94
Anexo XV. Comparación de respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 0 % composta y 100 % jal bajo condiciones de campo.	94
Anexo XVI. Comparación de respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en el tratamiento 10 % composta y 90 % jal bajo condiciones de campo.	95
Anexo XVIII. Comparación del pH en los distintos tratamientos sin siembra.	97
Anexo XIX. Comparación del pH del inicio y final del experimento de campo en los distintos tratamientos sin siembra.	97
Anexo XX. Comparación del pH al final del experimento en la rizósfera de las distintas especies y en tratamientos sin siembra.	97
Anexo XXI. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) en los distintos tratamientos sin siembra.	98
Anexo XXII. Comparación de la CE del inicio y final del experimento de campo en los distintos tratamientos sin siembra.	98
Anexo XXIII. Comparación de la CE al final del experimento en la rizósfera de las distintas especies y en tratamientos sin siembra.	98
Anexo XXIV. Mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$) acumulada en tratamientos sin siembra.	99
Anexo XXV. Influencia de plantas en mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$).	99
Anexo XXVI. Porcentaje de recuperación de estándares control y certificados en técnica de ICP-OES	100
Anexo XXVII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>A. farnesiana</i> bajo condiciones controladas.	101
Anexo XXVIII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>P. velutina</i> bajo condiciones controladas.	102
Anexo XXIX. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> bajo condiciones controladas.	103
Anexo XXX. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de <i>A. farnesiana</i> bajo condiciones controladas.	105

Anexo XXXI. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de <i>P. velutina</i> bajo condiciones controladas.....	106
Anexo XXXII. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> bajo condiciones controladas.	107
Anexo XXXIII. Concentraciones de metales (mg/Kg) en tejido vegetal de <i>A. farnesiana</i> crecida en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.	109
Anexo XXXIV. Concentraciones de metales en tejido vegetal de <i>P. velutina</i> crecida en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.	110
Anexo XXXV. Factor de acumulación de <i>A. farnesiana</i> bajo condiciones controladas.	111
Anexo XXXVI. Factor de acumulación de <i>P. velutina</i> bajo condiciones controladas.	112
Anexo XXXVII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>A. farnesiana</i> , bajo condiciones de campo.	113
Anexo XXXVIII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>P. velutina</i> , bajo condiciones de campo.	114
Anexo XXXIX. Concentración de metales (mg/Kg) en tratamientos sin siembra bajo condiciones de campo.	116
Anexo XXXX. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> , y tratamientos sin siembra bajo condiciones de campo.	117
Anexo XXXXI. Concentraciones de metales (mg/Kg) en tejido vegetal de especies crecidas en los distintos tratamientos en condiciones de campo y plantas de los parches de vegetación, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.	121
Anexo XXXXII. Factor de acumulación de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> bajo condiciones de campo.	124
XIII. BIBLIOGRAFÍA.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de los pasos del procesado mineral para la obtención del concentrado mineral y la consecuente generación de los jales	20
Figura 2. Estrategias de remediación o mitigación de la dispersión de contaminantes de los jales en relación al costo y tiempo empleado en el proceso	26
Figura 3. Localización de los parches de vegetación en el depósito de jales de Nacozari y esquematización de la colecta de muestras para el análisis de materia orgánica y nutrientes.	35
Figura 4. Fases del proceso de compostaje, mostrando los cambios de temperatura y de pH.....	39
Figura 5. Parámetros medidos durante el proceso de compostaje	44
Figura 6. Esquema de la distribución de los tratamientos en el experimento bajo condiciones de campo.....	46
Figura 7. Precipitación durante el experimento en campo.....	47
Figura 8. Concentración de CT, NT y PD en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación y lejos de los parches de vegetación, en capas a diferentes profundidades.....	59
Figura 9. Germinación y establecimiento de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en condiciones de controladas y de campo.....	61

Figura 10. Respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> establecidas en los diferentes tratamientos al finalizar el experimento bajo condiciones controladas.	64
Figura 11. Respuesta de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> establecidas en los diferentes tratamientos (10 y 20 % composta) al finalizar el experimento bajo condiciones de campo.	65
Figura 12. Valores de pH y CE en los tratamientos de mezclas de jal-composta (sin sembrar) al inicio y final del experimento bajo condiciones de campo	67
Figura 13. Valores de pH y CE en los tratamientos de mezclas de jal-composta sin sembrar y de la rizósfera de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> establecidas en 10 y 20 % de composta, al finalizar el experimento bajo condiciones de campo	68
Figura 14. Mineralización del carbono en los tratamientos de mezclas de jal-composta sin sembrar en muestras del inicio y final del experimento en campo.....	69
Figura 15. Mineralización del carbono en la rizósfera de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> crecidas en 20 % de composta y en los tratamientos sin sembrar 0 y 20 % composta	70
Figura 16. Factor de acumulación de metales en tejido aéreo de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas.....	74
Figura 17. Factor de acumulación de metales en tejido aéreo de <i>A. farnesiana</i> y <i>P. velutina</i> en los diferentes tratamientos bajo condiciones de campo.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos comunes de reactivos de flotación, modificadores, floculantes, coagulantes, reactivos hidrometalúrgicos y oxidantes	18
Tabla 2. Efectos negativos en la salud humana asociados con la exposición a metales.	23
Tabla 3. Contenido de nitrógeno y carbono de material orgánico utilizado para elaborar composta.	42
Tabla 4. Características de composta madura elaborada en las instalaciones de la ERNO.....	43
Tabla 5. Comparación de la concentración de metales en tejido vegetal y los Máximos Niveles Tolerables (MNT) de metales en alimento animal.....	73
Tabla 6. Comparación de la concentración de metales en tejido vegetal y los Máximos Niveles Tolerables (MNT) de metales en alimento animal.....	77

I. RESUMEN

Los depósitos de residuos de la actividad minera, denominados comúnmente como jales, representan un riesgo serio a la salud humana y al medio ambiente, dado que son una fuente de contaminación por metales. La fitoestabilización asistida por la adición de composta, es una técnica de remediación que usa la vegetación para mitigar la dispersión de estos contaminantes al medio circundante. Sin embargo, los jales presentan características que limitan el desarrollo de la vegetación, entre ellas, pH generalmente ácido, altas concentraciones de metales, bajos niveles de nutrientes y materia orgánica, y baja capacidad de retención del agua. Debido a la gran variedad de características fisicoquímicas que los jales mineros pueden presentar y las diferencias en flora regional, es necesario evaluar posibles alternativas locales específicas que permitan realizar fitoestabilización en estos sitios. Los jales mineros de Nacozari, Sonora son jales abandonados producto de la explotación de Cu, presentan un pH ácido, gran variedad de metales y formación de sales eflorescentes estacionales que aumentan las concentraciones de algunos de ellos, rebasando las concentraciones permitidas por la Norma Oficial Mexicana. En un estudio previo se ha documentado la colonización natural de estos jales por especies de plantas locales, restringidas en pequeños parches de vegetación. Sin embargo, parámetros fisicoquímicos como la concentración de metales del sustrato, el pH, la CE y la textura del suelo no son las principales limitantes ecológicas en el establecimiento de las plantas. En este trabajo se estudiaron los jales mineros de Nacozari, Sonora, para determinar los factores que limitan el desarrollo de dos especies abundantes en los parches de vegetación de estos jales (*Acacia farnesiana* y *Prosopis velutina*), determinar la influencia de la composta en el potencial fitoestabilizador de estas especies, así como el efecto de la adición de composta y de las plantas en las características del jal. Para ello, se realizaron experimentos con tratamientos de jales con adición de composta en condiciones controladas (adición de 0 %, 2.5 %, 5 % y 10 % en peso y un tratamiento de suelo externo al jal) y de campo (adición de 0 %, 10 % y 20 %). En ambos experimentos se evaluó, la germinación, establecimiento, respuestas de crecimiento (biomasa aérea, de raíces y altura), concentración de metales en tejido y en sustrato, factor de acumulación (concentración metales en tejido/concentración de metales en sustrato), en ambas especies, y en el sustrato se determinaron: pH, conductividad eléctrica y mineralización del carbono en el sustrato. Además, se midieron las concentraciones de metales en hojas de las

mismas especies que crecían naturalmente en los parches de vegetación en el jal, y se cuantificó la materia orgánica y nutrientes (CT: carbono total, NT: nitrógeno total, PD: fosforo disponible) del sustrato bajo arbustos y en claros en los parches, y lejos de los parches. Los resultados mostraron que en los parches donde crecen *A. farnesiana* y *P. velutina* en el jal tienen 3-5 veces más N y 3-15 veces más materia orgánica (CT) que el jal carente de vegetación circundante al parche. Esto, aunado a que el establecimiento de ambas especies fue nulo en el tratamiento de 0 % composta en campo, sugiere que el establecimiento de estas especies está fuertemente limitado por los nutrientes del sustrato. Sin embargo, la germinación > 50 % y el establecimiento cercano al 100 % en todos los tratamientos de condiciones controladas, regados diariamente, indican que el agua también puede estar co-limitando la germinación y establecimiento de plantas en los jales. La adición de composta aumentó la concentración de metales en la rizósfera, posiblemente asociados a una alcalinización del pH del sustrato y a los mayores niveles de materia orgánica. Por otra parte, la adición de composta aumentó la mineralización del carbono, es decir, que generó una mayor actividad microbiana potencialmente benéfica para las plantas. Además, la concentración de algunos metales en el tejido disminuyó con la adición de composta, lo cual resultó en un cambio de fitoextracción a fitoestabilización en los metales Cr, Ni y Se. Por último, las concentraciones de metales en los tejidos y los máximos niveles tolerables para animales, así como al factor de acumulación y las respuestas de crecimiento a bajos niveles de composta, indican que *A. farnesiana* tiene un mayor potencial para la fitoestabilización asistida con composta en los jales de Nacoziari. Así, la adición de composta logra mitigar las condiciones limitantes de los jales y facilita el establecimiento de especies, lo cual puede ser aprovechado para reducir el riesgo que representan los jales como fuente de contaminación.

ABSTRACT

Mining residues, commonly known as mine tailings represent a serious risk to human health and the environment given that they usually contain high levels of metal concentration. Compost-assisted phytostabilization is a remediation technique that use plants to reduce the spread of pollutants to the environment. However, mine tailings exhibit properties that limit plant establishment, such as generally having acid pH, high metal concentration, low levels of nutrient and organic matter and low water holding capacity. Given the variety of environmental conditions and local floras among mine tailings, it is necessary to evaluate possible local options for the phytostabilization in these sites. Mine tailings from Nacozari, Sonora were abandoned after years of Cu exploitation; they have an acidic pH, a wide variety of metals and form seasonal efflorescent salts that rise the concentration of some metals, surpassing the allowed levels from the Official Mexican Norm. Previous studies in the Nacozari mine tailings have documented a natural process of plant colonization by local plant species, restricted in small patches of vegetation. However, several physico-chemical parameters such as substrate metal concentration, pH, electrical conductivity and tailings texture were not major ecological drivers of plant establishment. The objectives of this thesis were to determine which factors limit the establishment of *Acacia farnesiana* and *Prosopis velutina* in the Nacozari mine tailings, assess the influence of compost in the phytostabilization potential of these plant species, and determining the influence of compost addition and established plants on tailings properties. Two experiments using different compost concentration were established: one under controlled condition (addition of 0 %, 2.5 %, 5 %, y 10 % in weight and a treatment of soil from outside of the mine tailings) and another in the field (addition of 0 %, 10 % and 20 % in weight). In both experiments several parameters were evaluated: germination, plant establishment, growth (above-ground biomass, root and height), metal concentration in plant tissue and in growing substrate, accumulation factor (metal concentration in shoot/metal concentration in substrate) in both species; furthermore pH, electrical conductivity and carbon mineralization in substrate were measured. In addition, leaf metal concentration was determined in plants that have naturally colonized the Nacozari tailings, and the organic matter and nutrients (TC: total carbon, TN: total nitrogen and AP: available phosphorus) of surface tailings substrate under plants from

patches, in sites between plants within patches and open spaces outside patches were also measured. Results showed that patches where *A. farnesiana* and *P. velutina* grew had 3-5 times more TN and 3-15 times more TC than in surrounding tailings outside patches. This pattern and the fact that seedling establishment failed under 0 % compost suggest that plant recruitment is strongly limited by nutrient availability in the substrate. However, germination values greater than 50 % and plant establishment near 100 % in all treatments evaluated under controlled conditions and under daily irrigation indicate that water availability can also co-limit germination and establishment of plants in tailings. Compost addition increased metal concentration in the rizosphere probably due to an increase in substrate pH and grater levels of organic matter. On the other hand, compost addition increased carbon mineralization, that is, produced greater microbial activity that was potentially beneficial for plants. Also, concentration of some metals decreased with compost addition which resulted in turning plants from metal accumulators to non-accumulators for Cr, Ni and Se. Finally, metal concentration in plant tissues, maximum tolerable levels for domestic animals, accumulation factor and the growth response to low compost concentration, indicates that *A. farnesiana* has a greater potential for compost-assisted phytostabilization in the Nacozari mine tailings. Thus, compost addition mitigates tailings limiting conditions and facilities the establishment of *A. farnesiana*, in such way that this species can be used to reduce the risks of the Nacozari tailings as a source of pollution.

II. INTRODUCCIÓN

La actividad minera ha generado depósitos de residuos abandonados con altas concentraciones de metales pesados y otros elementos potencialmente tóxicos, un bajo o nulo contenido de materia orgánica, vegetación escasa o ausente, y por lo general un pH ácido. En México estos residuos reciben el nombre de jales, mientras que en países como Argentina y Chile son conocidos como vertederos y relaves, respectivamente. En zonas áridas con periodos de sequía largos y lluvias estacionales y torrenciales, los jales son susceptibles a erosión eólica e hídrica, lo cual resulta en la dispersión de estos contaminantes a nivel local e incluso regional (Mendez & Maier, 2008; Meza-Figueroa et al., 2009; de la O-Villanueva et al., 2013; Parra et al., 2015; Sánchez-López et al., 2015; Parra et al., 2016). Aunado a esto, en jales de zonas áridas se forman sales eflorescentes con concentraciones aún mayores de metales pesados y de fácil dispersión por el viento (Meza-Figueroa et al., 2009; de la O-Villanueva et al., 2013). De esta manera, los jales son una fuente de contaminación por metales pesados por lo que representan una seria amenaza a la salud humana y al medio ambiente circundante (Parra et al., 2016).

Una estrategia económica y ecológicamente viable para mitigar la amenaza de los jales abandonados es la fitoestabilización, una técnica de fitorremediación (Mendez & Maier, 2008). La fitoestabilización consiste en la creación de una cobertura vegetal que prevenga la erosión hídrica y eólica e inmovilice los metales en la rizósfera o las raíces. De esta manera, se limita la acumulación de metales en los brotes de las plantas para evitar la incorporación de metales a la cadena trófica (Cunningham et al., 1995). Sin embargo, establecer exitosamente esta cobertura vegetal en los jales en zonas áridas es un reto, debido a que las plantas crecen en condiciones de estrés severo. Por un lado, están expuestas a las condiciones limitantes típicas de las zonas áridas (precipitación escasa, baja humedad ambiental y altas temperaturas). Por otro lado, están expuestas a la toxicidad provocada por las altas concentraciones de metales, un pH bajo, alta salinidad, falta de nutrientes esenciales, y a una baja capacidad de retención de agua del sustrato causada por su estructura edáfica poco desarrollada, las cuales son características típicas de los jales. Además, los jales carecen de una rica comunidad heterotrófica microbiana en el sustrato, lo cual puede limitar el reservorio y ciclo de nutrientes y otras interacciones positivas microbio-planta importantes para el desarrollo de las plantas (Mendez & Maier, 2008; Solis-Dominguez et al., 2012). De esta manera, el éxito del establecimiento de una cobertura vegetal en los jales

está ligado a la capacidad de las especies vegetales para enfrentar y/o modificar estas condiciones fisicoquímicas.

En la actualidad se conoce que muchas de las limitaciones al establecimiento y desarrollo de vegetación en los jales pueden superarse o ser mitigadas mediante la aplicación de enmiendas orgánicas como la composta o los biosólidos, o con la incorporación de cal y fertilizantes. En especial, se ha probado que la adición de composta tiende a elevar el valor de pH, lo que tiene como consecuencia la neutralización o alcalinización de jales ácidos, modifica la comunidad bacteriana, disminuye la solubilidad de los metales, y aumenta la disponibilidad de nutrientes y agua (Mendez & Maier, 2008; Solís-Domínguez et al., 2012; Bacchetta et al., 2015; Li & Huang, 2015; Sánchez-López et al., 2015; Parra et al., 2016). Por otra parte, las plantas pueden contribuir activamente a modificar las condiciones fisicoquímicas de los jales aportando materia orgánica, modificando el pH y teniendo una influencia sobre la microbiota (Solís-Domínguez et al., 2012; Gil-Loaiza et al., 2016). Sin embargo, aún son pocas las investigaciones que evalúan el papel de la adición de composta y de las plantas en modificar las condiciones fisicoquímicas en jales de zonas áridas bajo condiciones de campo. Se necesitan investigaciones que evalúen el desempeño de especies de plantas locales que colonizan naturalmente los jales, y determinen las condiciones y procesos bajo las que se pueden establecer y desarrollar, para así permitir su aprovechamiento y manejo en prácticas de fitoestabilización (Mendez & Maier, 2008; Santos et al., 2017).

Aledaño al poblado de Nacozari de García, Sonora se encuentra un depósito de jales abandonado con 3 millones de toneladas de residuos, producto de la extracción de cobre por la Moctezuma Copper Company en el periodo de 1895 a 1949 (de la O-Villanueva et al., 2013). En estos jales se han detectado grandes concentraciones de metales (principalmente Fe, Ti, Ba, Cu, Rb, Mo, Mn, Sr y Zn), además de un pH ácido (3.87 ± 0.3) y presencia temporal de sales eflorescentes (que pueden llegar a aumentar 230 veces la concentración de los metales). La concentración de Ag y Cr en las sales eflorescentes rebasa lo permitido por la legislación mexicana (NOM-157-SEMARNAT-2009). En estudio realizado por Meza-Figueroa y col. (2009) detectó niveles tóxicos de metales en zonas residenciales del poblado resultado de la dispersión de los metales, lo cual representa una oportunidad para emplear la fitoestabilización para mitigar el riesgo a la salud humana y ambiental.

Un estudio previo documentó que 46 especies de plantas han colonizado naturalmente los jales de Nacozari, aunque estas se encuentran solo en pequeños parches de vegetación

(Santos et al., 2017). Además, detectaron varias especies con signos de regeneración de sus poblaciones y que además tienen potencial fitoestabilizador (Santos et al., 2017). Aún se desconoce qué factores restringen la distribución de estas especies a dichos parches de vegetación, y si su establecimiento en otras partes del jal y su crecimiento pudieran verse favorecidas por la adición de composta. En el presente estudio se seleccionaron dos de estas especies con potencial fitoestabilizador y mayor abundancia en los parches de vegetación, *Acacia farnesiana* y *Prosopis velutina*, y mediante experimentos en condiciones controladas y de campo, se buscó responder a las siguientes preguntas: ¿la adición de composta tiene efecto sobre el establecimiento y crecimiento de estas especies?, ¿la adición de composta modifica la capacidad fitoestabilizadora de estas especies?, y ¿la adición de composta así como, la actividad de las plantas modifican el pH, la concentración de metales y la actividad microbiana?. Además, se realizó un estudio en áreas con vegetación y sin vegetación en el depósito de jales, donde se buscaba responder si el contenido de nutrientes (CT, NT y FD) en el sustrato es la principal limitante ecológica que restringe la distribución de las plantas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Generación de jales y depósitos de jales

La industria de la minería metalífera tiene como actividad principal la extracción y beneficio de metales asociados a minerales. El procesamiento de estos minerales da como resultado una concentración del metal de interés y a su vez la generación de grandes cantidades de residuos no deseados, conocidos como jales (Lottermoser, 2010).

A continuación, se describe brevemente el proceso para la obtención del concentrado y la generación de los jales: Una primera etapa consiste en la extracción, trituración y molienda de la roca que contiene el metal de interés. Esto sucede posterior a la exploración, una vez que se ha ubicado el yacimiento mineral, del cual se extraen grandes bloques de roca dura que posteriormente son triturados y molidos para la reducción de su tamaño. El objetivo de la reducción es liberar los minerales de mena (minerales de valor económico) de la fase de ganga (minerales que no tienen valor económico). La trituración es un proceso seco, sin embargo, la molienda involucra la abrasión de las partículas que generalmente son suspendidas en agua. La segunda etapa consiste en el proceso de separación como tal, de tal manera que la mena es separada de la ganga a través de distintos métodos, los cuales se basan principalmente en las propiedades gravimétricas, magnéticas, eléctricas o superficiales de cada mineral. Además, la adición de químicos como reactivos de flotación, modificadores, coagulantes, agentes hidrometalúrgicos y oxidantes (Tabla 1) según sea el caso del mineral, ayudando a la concentración y recuperación del metal de interés. Consecuentemente, los residuos son un conjunto de grandes cantidades de sólidos y líquidos, que son descargados en depósitos comúnmente llamados depósitos o presa de jales (Figura 1) (Lottermoser, 2010).

La fracción líquida contiene generalmente agua y dependiendo del método de beneficio, puede contener algunos niveles de químicos orgánicos, cianuro, ácido sulfúrico y otros reactivos empleados para la recuperación del mineral. Mientras tanto, la fracción sólida está compuesta de minerales de la fase de ganga, silicatos, hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Además, los procesos de recuperación del mineral de mena nunca son 100 % eficientes, por lo que en los jales siempre se encuentran al menos una pequeña fracción del mineral de mena que se extrajo al principio del proceso; es decir, que en los jales se pueden encontrar concentraciones de metal de interés económico, así como otros metales (Lottermoser, 2010; Kossoff et al., 2014). La eficiencia de los métodos de beneficio ha mejorado con el desarrollo tecnológico, por lo que

jales que son producto de la explotación minera del pasado, suelen contener metales en mayor concentración que los jales producto de la minería actual.

El porcentaje de los residuos depositados en los jales respecto al material extraído originalmente puede ser muy grande en comparación del concentrado mineral. En algunos casos cuando se extraen minerales metálicos de bajo grado (baja cantidad de minerales por tonelada de roca) más del 99 % del material extraído en un principio resulta como jales y sólo el 1 % como metal concentrado (Lottermoser, 2010).

Los depósitos de jales se ubican generalmente en depresiones geográficas, en tajos en el suelo a consecuencia del minado a cielo abierto, o se construyen en superficies planas cercanas a la mina donde se procesó el mineral (Lottermoser, 2010; Kossoff et al, 2014). Antiguamente para su construcción se empleaban materiales sobrantes del proceso de minería, ya que no existía ningún tipo de legislación o regulación ambiental respecto a la liberación o deposición de estos residuos (Ramos-Arroyo & Siebe, 2006; Lottermoser, 2010). Sin embargo, en la actualidad ya existen normas que regulan la construcción y el seguimiento de los depósitos de jales; los cuales emplean material de construcción especial para evitar cualquier impacto ambiental relacionado con su dispersión al medio circundante (NOM-141-SEMARNAT-2003; Lottermoser, 2010).

3.2. Características de los jales

Los jales varían notablemente en sus características físicas y químicas dependiendo del mineral que se explota, el proceso de trituración, molienda y concentración (principalmente por los reactivos que se emplean), y las reacciones químicas que sufren después que son depositados (Lottermoser, 2010).

Posterior a la descarga de estos residuos en el depósito de jales, el intemperismo y la interacción de sus componentes, generan reacciones químicas que conllevan a cambios en su concentración y composición química a través del tiempo. Por ejemplo, la lluvia puede diluir la concentración de la fracción líquida de estos, mientras que la evaporación provoca la concentración y precipitación de minerales secundarios; así mismo, de manera natural puede ocurrir la degradación de ciertos reactivos contenidos en los residuos, mediante la acción bacteriana, la interacción química de los componentes en el medio, e inclusive la exposición a la luz (degradación fotolítica). Además, las reacciones químicas entre los componentes pueden

generar condiciones ácidas o alcalinas, dependiendo de su composición, así como de la oxidación liberando a los metales contenidos en los minerales (lixiviación), o formando complejos (quelación) e inmovilizándolos. Este tipo de interacciones ocurren de una manera iterativa hasta alcanzar un equilibrio en el medio, mientras que al mismo tiempo ocurren procesos de diagénesis como la compactación, la cementación y la recristalización (Lottermoser, 2010; Kossoff et al., 2014). Consecuentemente la fracción líquida disminuye con el tiempo, quedando ocluida en los poros de la fracción sólida, que finalmente predomina en el depósito de jales.

El tamaño de grano de las partículas de los jales secos dependerá de las características de los minerales de ganga y mena, así como de los procesos involucrados en la liberación de esta última (trituración y molienda). No obstante, el tamaño de las partículas de los jales está relativamente restringido de arcillas a arenas (2 μm a 2 mm); donde el 70-80 % de su peso seco se constituye por partículas de arenas y el 20-30 % de partículas de arcillas y limos finos (Lottermoser, 2010).

En relación con los valores de pH y de conductividad eléctrica (CE) en los jales secos, estos varían ampliamente. Un análisis a nivel mundial de jales de minas de Cu, Au, Pb, Zn, Mn, Cd, entre otros metales de gran interés económico, muestran valores de pH muy variables, desde fuertemente ácidos (pH 1.90) hasta fuertemente alcalinos (pH 10.50); así mismo para la CE se reportan valores con un amplio rango, desde 0.15 mS/cm hasta 1 999.00 mS/cm (Li & Huang, 2015).

Los jales que se generan en el proceso de concentración de minerales asociados a Pb, Ag, Zn y Cu entre otros, provienen de sulfuros metálicos como pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S), galena (PbS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y arsenopirita (FeAsS) (Romero y Gutiérrez-Ruiz, 2010). Como resultado del procesamiento de estos minerales de sulfuros, los depósitos de jales presentan diferentes metales (metal de interés y otros metales asociados) en concentraciones muy variadas. Estos pueden encontrarse desde < 1 mg/Kg, hasta superando los 50 000 mg/Kg (Zhang, et al. 2007; Li & Huang, 2015).

Con respecto al contenido de macronutrientes como C, N y P (considerados formadores de vida) en los jales, se considera que la concentración que presentan es generalmente baja, inclusive nulas en algunos casos (Mendez & Maier, 2008; Li & Huang, 2015). Por ejemplo, para el carbono orgánico de "suelo" (COS) se han reportado concentraciones desde 0 a 6.77 %,

mientras que para nitrógeno total (NT) de 0.0009 a 0.59 % en jales de diferentes regiones del mundo (Li & Huang, 2015).

Tabla 1. Ejemplos de reactivos de flotación, modificadores, floculantes, coagulantes, reactivos hidrometalúrgicos y oxidantes (Lottermoser, 2010).

Clase	Uso	Ejemplos de reactivos
Reactivos de flotación		
a) Espumantes	Actúan como medio de flotación.	Reactivos orgánicos superficiales como: aceite de pino, propilenglicol, alcoholes alifáticos, ácido cresílico.
b) Colectores	Para cubrir selectivamente partículas con una superficie repelente de agua atractiva a las burbujas de aire.	Agua soluble, reactivos orgánicos superficiales como amina, ácidos grasos, xantatos.
Modificadores		
a) Reguladores de pH	Para cambiar el pH y promover la flotación.	Cal, cal hidratada, calcita, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, amoníaco, ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido clorhídrico.
b) Activadores y depresores	Para modificar selectivamente la respuesta de flotación de los minerales presentes.	Reactivos orgánicos superficiales y diversos compuestos orgánicos como: sulfato de cobre, sulfato de zinc, sulfato de sodio, nitrato de plomo, cal y silicato de sodio.
c) Aceites	Para modificar la espuma y actuar como colector.	Queroseno, aceites combustibles, aceites de alquitrán.
Floculantes	Para promover la formación de grandes partículas y una sedimentación eficiente, haciendo que las partículas más pequeñas se adhieran a partículas más grandes.	Arcillas, hidróxidos metálicos, polisacáridos, derivados del almidón.
Coagulantes	Promueven la formación de partículas más grandes y una sedimentación eficiente reduciendo las fuerzas netas	Sulfato férrico y ferroso, sulfato de aluminio, cloruro férrico.

	repulsivas en las superficies de las partículas.	
Agentes Hidrometalúrgicos	Para lixiviar selectivamente los minerales de mena.	Ácido sulfúrico, cianuro de sodio.
Agentes oxidantes	Para oxidar el agua involucrada en el proceso.	Peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, cloruro férrico, permanganato de potasio.

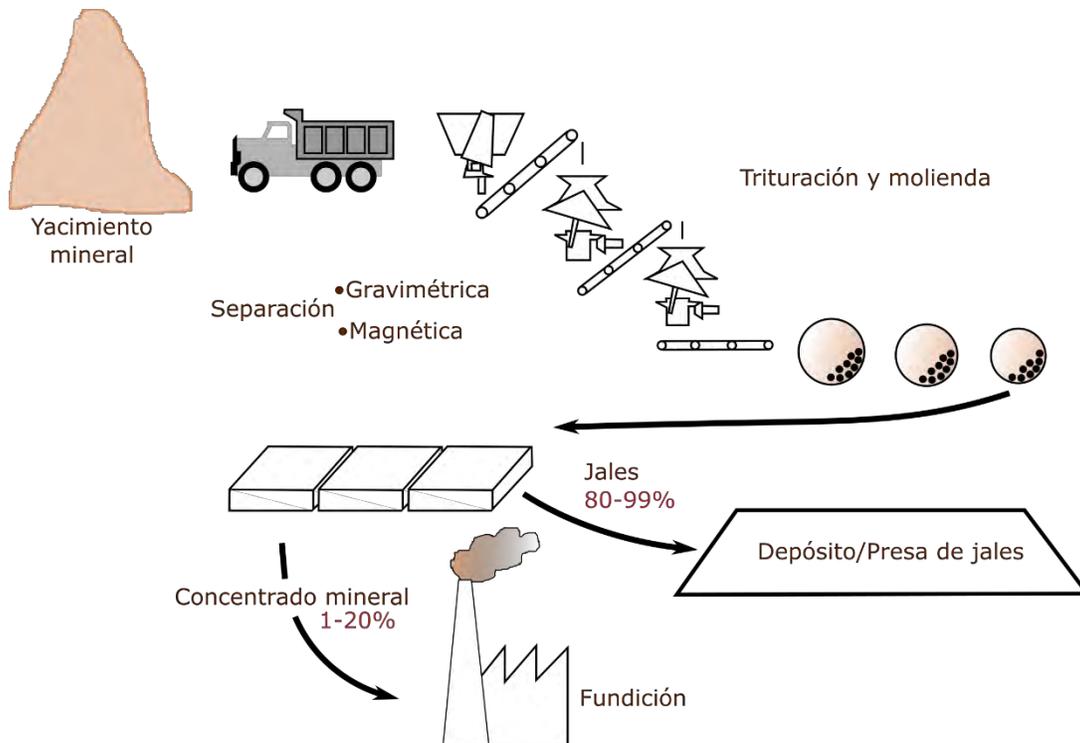


Figura 1. Representación de los pasos del procesamiento mineral para la obtención del concentrado mineral y la consecuente generación de los jales (modificado de Dold, 2010).

Finalmente, los jales secos no se consideran suelos, debido a la divergencia entre estos en sus características mineralógicas y químicas. Desde el punto de vista de la pedogénesis, los jales pueden ser mejor vistos como material parental nuevo, más que como suelos. Un análisis de similitud (clusters) realizado por Li y Huang (2015), basado en perfiles mineralógicos entre varios materiales terrígenos, incluyendo jales, suelos, restos de mina de carbón, así como cenizas volcánicas, mostró que los jales están más cercanos de las cenizas volcánicas, que de los suelos y los restos de mina de carbón.

Los minerales destacados en los jales son sulfuros metálicos, como se mencionó con anterioridad, típicamente pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2) entre otros, considerados

minerales primarios, los cuales son raramente encontrados en los suelos. En los suelos abundan los minerales arcillosos, como caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e illita ($((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$), que son minerales secundarios. La principal consecuencia de la dominancia de minerales primarios en los jales es la inestabilidad geoquímica. Los minerales primarios son más susceptibles al intemperismo que los minerales secundarios, mostrando una geoquímica inestable. A diferencia de los suelos que se caracterizan por poseer una geoquímica estable o casi estable después de sufrir un extenso intemperismo, lixiviación y alteraciones bióticas (Li & Huang, 2015).

3.3. Preocupación ambiental de los jales

Los depósitos de jales secos generalmente permanecen desnudos (sin vegetación) durante décadas (inclusive siglos), quedando expuestos a la erosión hídrica y eólica a causa del intemperismo, dispersándose al medio ambiente circundante, generando un problema ambiental e inclusive a la salud del ser humano (Mendez & Maier, 2008; Meza-Figueroa et al., 2009; Huang et al., 2011, 2012; de la O-Villanueva et al., 2013).

3.3.1. Dispersión de los contaminantes de los jales (DAM y sales eflorescentes)

En climas húmedos y templados, la dispersión ocurre principalmente facilitada por el agua, al formar el llamado drenaje ácido de mina (DAM) que se dispersa por escurrimientos superficiales, mientras que en zonas áridas la dispersión ocurre principalmente facilitada por el viento (Romero et al., 2008).

El DAM se forma cuando por acción del agua y del aire se oxidan sulfuros metálicos reactivos y forman lixiviados con pH bajos y altas concentraciones de metales, que al transportarse pueden contaminar suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas (Romero et al., 2008). Sin embargo, no toda la oxidación de los sulfuros metálicos produce DAM. Este sólo se forma cuando los minerales productores de ácido (sulfuros metálicos) exceden la capacidad de los carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos para neutralizarlos. Por el contrario, cuando la capacidad de neutralización supera a la de acidificación, los lixiviados generados tendrán un pH cercano al neutro, lo cual causa que los metales no entren en solución, disminuyendo así su movilidad (más adelante se explicará con mayor detalle acerca del pH y la interacción con los metales) (Romero et al., 2008).

La oxidación de los sulfuros en jales de regiones áridas y semiáridas, debido a la baja precipitación, ocurre principalmente en horizontes arcillosos donde se puede encontrar mayor humedad. En estas condiciones, los metales pueden migrar hacia la superficie por capilaridad donde se depositan en forma de sales solubles o eflorescentes tras la evaporación, lo cual resulta en una concentración de metales mayor que la de los depósitos de jales. Esta acumulación de sales genera una capa de material fino que fácilmente puede ser transportado por el viento (Romero et al., 2008). Así, las partículas cargadas de metales producto de la actividad minera en zonas áridas y semiáridas se dispersan principalmente por el viento, resultando además en contaminación atmosférica, aunque también podrían contaminar aguas superficiales y subterráneas en condiciones de lluvia abundante (Meza-Figueroa et al., 2009; de la O-Villanueva et al., 2013).

3.3.2. Metales: Características y problemas relacionados con la salud humana

Según la Real Academia Española (2017), los metales se definen como elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores de calor y electricidad (buena ductilidad), poseer un brillo característico y una alta densidad. Además de encontrarse en estado sólido a temperatura ambiente (a excepción del Hg); y cuando sus sales se encuentran en solución forman iones electropositivos (cationes).

Así mismo, algunos metales están incluidos dentro del término de “metales pesados”, el cual es un término arbitrario e impreciso, refiriéndose éste a cualquier elemento que tenga propiedades metálicas (ductilidad, densidad, estabilidad como cationes, especificidad de ligandos, etc.) y un número atómico mayor de 20 (Raskin et al., 1994).

Por lo mismo y para fines prácticos en este trabajo, nos referiremos a metales de manera general incluyendo a cualquier elemento químico con propiedades metálicas (metales de transición, metales de postransición, metales alcalinos, metales alcalinotérreos y metaloides).

Los metales están presentes naturalmente en el ecosistema y muchos son esenciales para los seres vivos (p. ej. As, Ca, Cl, Cu, F, Fe, I, Mn, Mo, Zn), ya que conforman cofactores esenciales para metaloproteínas y enzimas; sin embargo, deben estar presentes en cierto rango de concentración (Kennedy & Kirkwood, 2015). A concentraciones demasiado bajas, los metales conducen a una disminución en la actividad metabólica; y por lo contrario, a concentraciones altas, pueden actuar de manera deletérea, bloqueando grupos funcionales esenciales, desplazando otros iones metálicos o modificando la conformación activa de las moléculas

biológicas (Collins y Stotzky, 1989; Garbisu & Alkorta, 2003). Estos efectos negativos afectan tanto a microorganismos como a organismos más complejos (protistas, hongos, plantas y animales). Por otra parte, hay metales que se consideran no esenciales para los seres vivos (p. ej. Be, Cd, Hg, Pb, Sb, Ti), y la exposición a estos pueden inhibir la actividad metabólica, inclusive en concentraciones muy bajas (Garbisu & Alkorta, 2003; Kennen & Kirkwood, 2015). En la Tabla 2, se muestran algunos efectos negativos en la salud humana debido a la exposición de diferentes metales.

Tabla 2. Efectos negativos en la salud humana asociados con la exposición a metales.

Elemento	Efectos negativos
Aluminio Al	Sobreexposición al aluminio puede causar enfermedades de los huesos y del cerebro, la inhalación de polvo contaminado con aluminio puede causar problemas en los pulmones.
Arsénico As	Debido a sus efectos en muchas reacciones enzimáticas en el organismo, la toxicidad del arsénico puede causar efecto en múltiples órganos como el corazón, los pulmones y los riñones. Por otra parte, puede afectar el sistema neurológico y la piel, provocando dolores de cabeza y confusión, así como lesiones en la piel y pérdida de cabello.
Boro B	En dosis altas, el boro afecta el sistema cardiovascular y puede causar defectos de nacimiento.
Cadmio Cd	El cadmio generalmente tarda años en acumularse en el cuerpo, pero puede dañar seriamente los pulmones y los riñones, los huesos se ablandan cuando los niveles se vuelven tóxicos. La exposición aguda puede causar escalofríos, dolores y fiebre.
Cromo Cr	El cromo es un potente carcinógeno y también puede causar problemas respiratorios y cutáneos.
Cobalto Co	El cobalto tiene efectos sobre la salud humana, que incluyen daño al corazón, los pulmones y los riñones, así como defectos de nacimiento.
Cobre Cu	El envenenamiento por cobre causa daño en los riñones y el hígado, vómitos e incluso coma.
Flúor F	Intoxicación por flúor puede provocar náuseas, vómitos y sensación de hormigueo en las extremidades.
Hierro Fe	El hierro generalmente tiene pocos efectos sobre la salud humana, puede ser tóxico en dosis extremadamente altas, sobre todo en niños pequeños.

Mercurio Hg	La sobreexposición crónica de mercurio lleva a un mayor riesgo de cáncer, defectos de nacimiento y deterioro neurológico.
Manganeso Mn	El manganeso es esencial para la salud humana en pequeñas cantidades. Sin embargo, en dosis extremadamente altas puede causar efectos perjudiciales neurológicos y defectos de nacimiento.
Molibdeno Mo	La exposición crónica a largo plazo de molibdeno puede dañar el hígado y los riñones.
Níquel Ni	El níquel en niveles extremadamente altos es carcinógeno. Sin embargo, generalmente la sobreexposición resulta en dermatitis, problemas respiratorios y gastrointestinales.
Plomo Pb	La sobreexposición al plomo puede causar daños graves en los órganos, daño cerebral y retraso en el desarrollo. Los niños están en riesgo de daño neurológico
Selenio Se	El selenio resulta tóxico en grandes cantidades, causando la pérdida de cabello y de las uñas, problemas respiratorios o síntomas neurológicos tales como entumecimiento.
Zinc Zn	Los efectos tóxicos del zinc pueden causar fiebre, escalofríos y deterioro neurológico.

Fuente: Kennen & Kirkwood, 2015.

El daño que los metales pueden causar a la salud o al ambiente en general depende de su biodisponibilidad, es decir, de la fracción de los elementos que se encuentre disponible para ser absorbida por un organismo, la cual estará en función de la solubilidad de las fases minerales que contengan dichos elementos (Romero, 2004; Kennen & Kirkwood, 2015). Así mismo, la toxicidad de los metales varía ampliamente, aún para un mismo elemento, dependiendo de la especie química y mineralógica (Helawell, 1988).

La principal característica de los metales es que estos no sufren degradación química ni biológica que pueda alterar o reducir su toxicidad a través del tiempo (Knox et al., 2000; Adriano et al., 2004). Sin embargo, pueden ser transformados, al sufrir cambios en su estructura atómica, como cambios en su estado de oxidación, o, al formar complejos con compuestos orgánicos (Garbisu & Alkorta, 2003); haciendo que estos sean más o menos solubles en el medio, y así modificar su biodisponibilidad. Así mismo, referente a la biodisponibilidad de los metales, aspectos como el pH, la presencia de quelantes y de materia orgánica en el medio son importantes (Kennen & Kirkwood, 2015).

El pH es una medida de la cantidad de iones H⁺ y OH⁻ disponibles. Cuando el suelo es ácido, es decir, con pH bajo (mayor presencia de iones H⁺ que OH⁻), las superficies minerales

tienden a cargarse positivamente (+); mientras que cuando son alcalinos, con pH alto (mayor presencia de iones OH⁻ que H⁺), las superficies minerales son más negativas (-). Debido a que la mayoría de los metales se encuentran como cationes (+), la interacción iónica en suelos ácidos (catión-catión) da como resultado la desorción de los minerales que contiene a los metales, haciéndolos solubles y con ello biodisponibles; en cambio, en suelos alcalinos, la interacción iónica (catión-anión) da como resultado una adsorción de estos minerales a las partículas del suelo, haciéndolos menos solubles y por ende no biodisponibles (Romero, 2008; Kennen & Kirkwood, 2015). Lo antes mencionado sucede de manera inversa para metales que se encuentran en forma de anión (-) como es el caso del arsénico, que en medios alcalinos se encuentra biodisponible, y en medios ácidos se encuentra adsorbido, haciéndolo no biodisponible (Kennen & Kirkwood, 2015).

Los quelantes, también conocidos como secuestradores de metales, son sustancias que tienden a construir moléculas complejas junto a los iones metálicos. En los compuestos quelantes, un ión metálico se coordina con una base orgánica polifuncional para formar un compuesto estable en forma de anillo (no iónico) soluble en el medio (Caneva et al., 2000). Por lo que la presencia de estos en el “suelo” promueve la movilidad y biodisponibilidad de los metales (Schulze et al., 2005; Volke-Sepúlveda et al., 2005; Kennen & Kirkwood, 2015).

3.4. Estrategias para mitigar la dispersión de contaminantes de los jales

Algunas de las estrategias para mitigar la dispersión de los contaminantes de los jales mineros al medio ambiente circundante y su biodisponibilidad incluyen métodos físicos, químicos, térmicos y biológicos. Dentro de los métodos físicos está la construcción de barreras para evitar la movilización de los contaminantes, tamizar y lavar los suelos contaminados, extraer y movilizar los metales de un sitio a otro, y en el caso de los metales reactivos encapsularlos con cemento o polietileno. Como métodos químicos está la implementación de agentes neutralizadores para disminuir la movilidad de los metales. Los métodos térmicos están relacionados con la incineración del suelo y captura de compuestos volátiles. Por otro lado, los métodos biológicos se caracterizan por el empleo de organismos (plantas y microorganismos) para extraer, estabilizar y disminuir su biodisponibilidad. Los métodos físico-químicos son generalmente muy caros (existen algunas estimaciones que van desde 200 hasta 600 dólares por tonelada de sustrato contaminado), y pueden ser la causa de una contaminación secundaria.

Por otro lado, los métodos biológicos son de bajo costo, no impactan, pero se requiere más tiempo para que el sitio sea descontaminado, ver Figura 2.

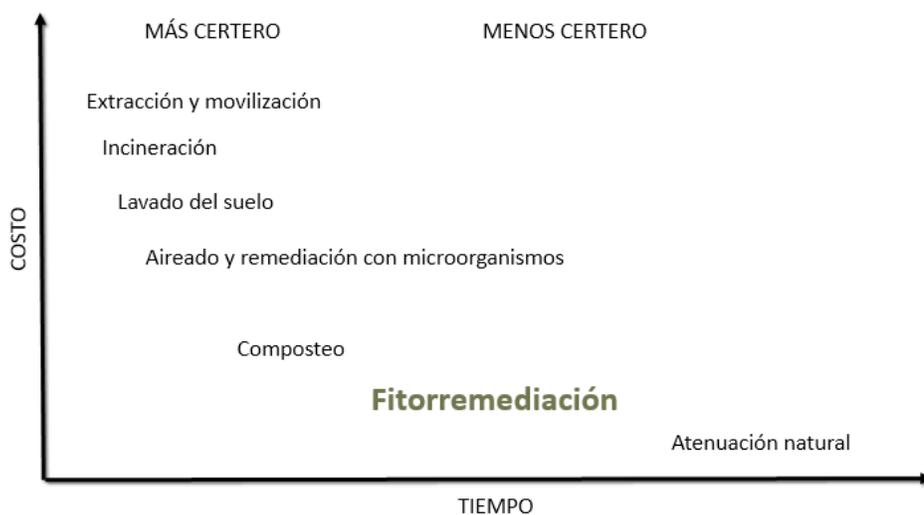


Figura 2. Estrategias de remediación o mitigación de la dispersión de contaminantes de los jales en relación al costo y tiempo empleado en el proceso (tomado de Kennen y Kirkwood, 2015).

3.4.1. Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología que utiliza a las plantas para extraer, mitigar o estabilizar los contaminantes inorgánicos como los metales, así como también contaminantes orgánicos como algunos tipos de plaguicidas y derivados del petróleo (Cunningham et al., 1995). Dentro de la fitorremediación se distinguen distintas categorías, entre estas se encuentran: la fitoextracción, la fitoestabilización, la fitoinmovilización, la fitovolatilización y la rizofiltración, por mencionar algunas (Kennen & Kirkwood, 2015). La fitoextracción se refiere al uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos para retirarlos del sustrato contaminado mediante su absorción y concentración en las partes cosechables. La fitoestabilización se caracteriza por reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio. La fitoinmovilización está relacionada con el uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización, así como la adsorción de los contaminantes en el suelo; esta técnica al igual que la fitoestabilización se considera una técnica de contención, ya que no se incorporan los contaminantes a los tejidos aéreos de las plantas. La fitovolatilización se refiere al uso de plantas para eliminar los contaminantes del medio mediante el proceso de

volatilización, incorporando los contaminantes a los tejidos y posteriormente liberándolos a la atmósfera. En la fitodegradación se hace uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos. Y por último la rizofiltración, consiste en el uso de las raíces de las plantas para absorber y adsorber contaminantes del agua contenida en el sustrato y otros efluentes acuosos (Carpena & Bernal, 2007).

La fitoestabilización es considerada una buena estrategia para reducir el peligro de los residuos mineros, debido a que consiste en la creación de una cubierta vegetal que previene la erosión y estabiliza los metales en las raíces mientras que limita la acumulación de estos en sus brotes. Sin embargo, el éxito de ésta al igual que el resto de las técnicas de fitorremediación tiene como principal obstáculo que la mayoría de los jales son un mal sustrato para el crecimiento de las plantas.

3.4.1.1. Limitantes del sustrato en el establecimiento de plantas

El suelo o sustrato cumple varias funciones que permiten la vida de las plantas terrestres (Brady & Weil, 2017). El suelo brinda soporte físico al ser el principal sostén donde se anclan las plantas. Provee agua al ser el medio donde se almacena y es tomado este recurso que las plantas consumen en grandes cantidades, y la capacidad de retención y provisión de agua a las plantas depende mucho de la textura del suelo y es afectada además por la salinidad. Provee de nutrientes a las plantas, tanto micro como macronutrientes. Además, el suelo provee aire para el intercambio gaseoso y modera la temperatura de los tejidos subterráneos. Tomando en cuenta la importancia del suelo en estos diferentes aspectos resulta evidente que diferentes características del suelo pueden resultar estresantes o limitantes para el desarrollo de la vegetación.

Para las prácticas de fitoestabilización, los jales fungen como el sustrato sobre el que se desarrollarán las plantas a utilizar. Sin embargo, los jales presentan ciertos retos y limitantes para el desarrollo de las plantas. Por un lado, la textura arenosa y la alta salinidad típicas de los jales hacen que tengan una pobre retención de agua y que el agua retenida esté aún menos disponible para las plantas. La alta concentración de metales pesados hace que algunos elementos, incluso algunos considerados micronutrientes, se encuentren en concentraciones tóxicas para las plantas, mientras que los jales poseen concentraciones muy pobres de macronutrientes como el nitrógeno y fósforo, aunado a la ausencia de una rica comunidad

microbiana (Mendez & Maier, 2008). Es de resaltar además que el pH ácido típico de los jales pudiera causar que metales pesados aumentaran su disponibilidad mientras que la disponibilidad de macronutrientes disminuiría aún más (Brady & Weil, 2017). Todas estas características representan retos para la fitoestabilización. Afrontar estos retos implica seguir buscando especies capaces de sobrevivir, crecer y reproducirse en estas condiciones, además de poseer las características deseables para evitar la dispersión de los contaminantes al ambiente. Paralelamente, se deben desarrollar técnicas que permitan mejorar las condiciones del jal para las plantas como la aplicación de enmiendas orgánicas como la composta o biosólidos, al igual que la incorporación de tierra vegetal, cal o distintos fertilizantes (Mendez & Maier, 2008).

3.4.1.2. Uso de composta en la fitorremediación

El aumento en el contenido de materia orgánica provoca grandes diferencias en las características físicas de un sustrato, incluyendo la capacidad de absorción, retención de agua, y la formación de su estructura (agregación y aireación). Tiene un efecto importante en propiedades químicas, tales como la capacidad de intercambio catiónico y la quelación de metales y otros iones; así como la modificación del pH del mismo (Karthikeyan & Kulakow, 2003). Además, también modifica condiciones biológicas, debido a la incorporación de nutrientes esenciales como carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en forma lábil y recalcitrante (Solis-Dominguez et al., 2012; Bolan et al., 2014; Gil-Loaiza et al., 2016; Parra et al., 2016). Así mismo, sirve de medio para la inoculación de microorganismos heterotróficos benéficos en el crecimiento vegetal, y consecutivamente a la salud de los ecosistemas a largo plazo (Mendez & Maier, 2008; Solis-Dominguez et al., 2012; Gil-Loaiza et al., 2016).

La comunidad heterotrófica de microorganismos está formada principalmente por bacterias y hongos micorrízicos, que están involucrados en un número de funciones críticas en la dinámica de los suelos. Por ejemplo, como facilitadores en el ciclo de la materia orgánica, formación de agregados del suelo y aumento en la absorción de nutrientes (Grandlic, 2008; Ortega-Larrocea et al., 2010). Por otra parte, ayudan en el proceso de fitoestabilización en la solubilización y sorción de los metales, así como de protección de las plantas a la toxicidad de estos (Grandlic, 2008; Leung et al., 2013).

En un estudio, en donde se utilizaron macetas bajo condiciones de invernadero con plantas nativas con capacidad de tolerar las condiciones adversas de los jales de zonas áridas y potencial fitoestabilizador (*Acacia greggi*, *Buchloe dactyloides* y *Prosopis juliflora*), se encontró que la adición de composta favorece el crecimiento de las especies (Solis-Dominguez et al., 2012). Además, este estudio sugiere que la composta reduce la acumulación de metales en el tejido de las plantas. La adición de composta también puede aumentar el pH del sustrato e incrementar la diversidad de las comunidades, así como un aumento en CO y NT, que beneficia el establecimiento y mantenimiento de las plantas (Solis-Dominguez et al., 2012).

Posterior al estudio bajo condiciones de invernadero, Gil-Loaiza y col. (2016) realizaron un experimento de campo bajo condiciones de jales, usando las mismas especies. En dicho estudio se demostró que la siembra directa en campo, asistida con composta, puede ser viable para el establecimiento de estas especies de plantas en este tipo de sustratos, con el objetivo de formar una cubierta vegetal que mitigue la dispersión de dichos contaminantes al medio ambiente circundante. Por otra parte, se encontró que en tratamientos donde no se añadió composta, el establecimiento fue nulo, lo que demuestra que este tipo de sustratos presentan características adversas para el establecimiento de las plantas. Así mismo, al igual que en el estudio realizado por Solis-Dominguez y col. (2012), se encontró que el aumento de biomasa de las plantas estuvo directamente relacionado con el contenido de nutrientes, el aumento de pH y de la comunidad bacteriana heterotrófica.

IV. JUSTIFICACIÓN

En el estudio realizado por Santos y col. (2017), se llevó a cabo un inventario florístico como primer paso enfocado a la fitorremediación, del cual se identificaron especies con potencial fitoestabilizador para los jales de Nacozari, Sonora. Además, encontraron que las especies establecidas en los jales estaban distribuidas en parches, por lo que compararon algunos parámetros fisicoquímicos entre los parches y las áreas desprovistas de vegetación (pH, CE, contenido de EPT y textura del suelo) para intentar conocer los factores que limitaron la distribución de las plantas. Los resultados no mostraron diferencias significativas entre las distintas áreas que explicara el patrón de distribución. En dicho estudio no se evaluaron otras variables como la concentración de materia orgánica y nutrientes, que probablemente constituyen una limitante de gran importancia en el establecimiento de las plantas en este depósito de jales abandonado. Identificar las limitantes ecológicas de las plantas en el depósito de jales de Nacozari, ayudara a la implementación de fitorremediación en este tipo de sitios, con el fin de reducir la dispersión de los jales, y así mitigar el daño a la salud humana y al medio ambiente circundante.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Explorar las limitaciones ecológicas del establecimiento de plantas en el depósito de jales abandonados de Nacozeni.

5.2. Objetivos particulares

- a) Comparar el contenido de nutrientes y materia orgánica en áreas desprovistas de vegetación y con vegetación en el depósito de jales de Nacozeni.
- b) Evaluar la germinación, establecimiento y respuestas de *A. farnesiana* y *P. velutina* bajo tratamientos con diferentes concentraciones de composta (mezclas composta-jal), en experimentos bajo condiciones controladas y condiciones de campo.
- c) Cuantificar los cambios en el pH, CE, actividad microbiana y concentración de metales del sustrato en condiciones de campo causados por la adición de composta y el establecimiento de las especies vegetales.
- d) Analizar la acumulación de algunos metales en tejidos de plantas crecidas bajo los diferentes tratamientos de los experimentos (mezclas composta-jal).

VI. HIPÓTESIS

Los jales generalmente son sustratos carentes de materia orgánica y nutrientes que limitan el desarrollo de una cobertura vegetal como medida de contención para la dispersión de contaminantes. La restricción de las plantas registradas en los jales abandonados de Nacozari a parches de vegetación que ocupan 0.84% del depósito puede estar asociada al contenido de materia orgánica, y nutrientes (CT, NT y PD).

La incorporación de composta en este depósito de jales, generará modificaciones de manera positiva en parámetros fisicoquímicos y biológicos (pH, CE, actividad microbiana, concentración de metales en los jales) beneficiando el establecimiento y desarrollo de especies con potencial estabilizador.

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el distrito minero de Nacozari, el cual se localiza al noreste del estado de Sonora. El clima de la región es semiárido (BS1), con un rango de temperatura media anual de 12.1° a 27.9 °C, siendo enero el mes más frío y junio el más caliente. La precipitación media anual es de 578 mm, y ocurre mayormente (> 60 %) en los meses de julio, agosto y septiembre (Servicio Meteorológico Nacional, 2017). La vegetación se compone primordialmente de matorral espinoso de piedemonte y bosque de encino, además de vegetación ribereña (Martinez-Yrizar et al., 2010). Entre las especies que destacan por su abundancia en los alrededores de Nacozari se encuentran en el matorral espinoso: *Acacia constricta*, *Acacia farnesiana*, *Fouquieria splendens*, *Stenocereus thurberi* y *Mimosa dysocarpa*; mientras que entre la vegetación ribereña se encuentra principalmente: *Prosopis velutina*, *Parkinsonia aculeata*, *Baccharis sarothroides*, *Baccharis salicifolia* y *Acacia farnesiana* a lo largo del Río Nacozari (Santos et al., 2017). El suelo local se compone principalmente de Leptosoles, Phaezoms y Regosoles, según la carta de suelo de Nacozari H12-6 (INEGI, 2006).

El área de estudio se ubica específicamente en un depósito de jales abandonado de Nacozari con coordenadas 30°22'2.4"N y 109°41'38"O, a una altitud de 1 050 msnm, el cual se encuentra rodeado por casas de los habitantes del pueblo. Este depósito ocupa un área aproximada de 19 ha, y un volumen de 1.5 millones de m³ y 3.3 millones de toneladas de jales (De la O-Villanueva et al., 2013). Se componen principalmente de minerales como cuarzo (SiO₂), yeso (CaSO₄H₂O), lepidocrocita (γFeO[OH]) y sulfato de cobre (CuSO₄) (Romero et al., 2008). La textura en su mayoría (80 %), es de granulometría gruesa, sin embargo, presentan una variación notable desde arenas gruesas a limos finos (De la O-Villanueva et al., 2013). El pH promedio es de 3.8 ± 0.3, y la conductividad eléctrica es de 340.1 ± 2 μS/cm. El 0.84 % (1 591 m²) del total del área está cubierto por diferentes tipos de plantas (principalmente arbustos y herbáceas) que conforman cuatro parches de vegetación (Figura 3). Los parches de vegetación varían de tamaño desde 34 a 743 m², y los componen 42 especies de plantas (15 perennes y 27 anuales) distribuidas en 16 familias de angiospermas (Santos et al., 2017). Las especies perennes más abundantes son *Acacia farnesiana*, *Brickellia coulteri*, *Gnaphalium leucocephalum*, *Baccharis sarothroides* y *Prosopis velutina* con valores medios entre 0 y 13 individuos/100 m²; mientras

que entre las especies anuales más comunes se encuentran *Amaranthus watsonii*, *Boerhavia coulteri*, *Solanum holtzianum* y *Bromus catharticus* con valores medios entre 0 y 16 individuos individuos/m² (Santos et al., 2017).

Los metales presentes con mayor concentración en el depósito de jales son el Fe (31 739 ± 381.9 mg/Kg), Cu (400.5 ± 15.8 mg/Kg), Rb (298.4 ± 5.6 mg/Kg) y Mn (158.5 ± 10.5 mg/Kg); además, también se encuentran metales de importancia por su riesgo para la salud humana como el Pb y As, que en comparación con los metales antes mencionados presentan concentraciones más bajas (29.3 ± 4 y 39 ± 4.2 mg/Kg, respectivamente). En las sales eflorescentes que se forman en la superficie del depósito de jales después de la temporada de lluvias (aumento en CE hasta 10 mS/cm, Palomino-Medina, 2016), las concentraciones de ciertos metales son mucho mayores que las contenidas en el depósito, como es el caso del Zn (17 858 ± 238.5), Cu (68 751 ± 865 mg/Kg) y Mn (31 084 ± 458 mg/Kg) que llegan a ser de 170 a 230 veces mayores que los propios jales, entre otros metales (Meza-Figueroa et al., 2009). Respecto a la legislación mexicana de manejo de residuos mineros (157-SEMARNAT-2009), la concentraciones de Hg (28.1 ± 2.8 mg/Kg) en el depósito de jales, así como Cr y Ag (219.3 ± 68.6; 321 ± 16 mg/Kg) en las sales eflorescentes, reportadas por Meza-Figueroa y col. (2009) rebasan lo permitido por esta Norma (Hg 4 mg/Kg; Cr y Ag 100 mg/Kg). Además, Palomino-Medina (2016) reporta concentraciones de As (106.28 mg/Kg) en el depósito de jales que rebasan lo máximo permitido para suelos con uso residencial (22 mg/Kg) (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

7.2. Análisis de materia orgánica y nutrientes en áreas con vegetación y desprovistas de vegetación en el depósito de jales

Se comparó el contenido de materia orgánica y nutrientes entre áreas con vegetación y áreas desprovistas de vegetación, dentro y fuera de los cuatro parches de vegetación en el sitio de estudio. Los nutrientes analizados fueron nitrógeno total (NT) y fósforo disponible (FD), además del contenido de materia orgánica, representado por el contenido de carbono total (CT).

7.2.1. Colecta y preparación de muestras

Dentro de cada parche se tomaron muestras justo debajo de la copa de varios arbustos (*Acacia farnesiana*, *Baccharis sarothroides*, *Brickellia coulteri* y *Prosopis velutina*) y en claros (áreas

desprovistas de vegetación) entre el conjunto de arbustos; y fuera de cada parche a \approx 50-100 m alejado de la vegetación (Figura 3).

Se colectaron 3 muestras aleatorias de jal de la capa más superficial (0-10 cm) y 3 muestras de una capa más profunda (10-20 cm) en cada una de las áreas determinadas para cada parche. Las 3 muestras por capa de cada área se mezclaron para formar una muestra compuesta; por lo tanto, se tuvieron 2 muestras compuestas por cada área determinada para cada uno de los parches de vegetación del sitio de estudio.

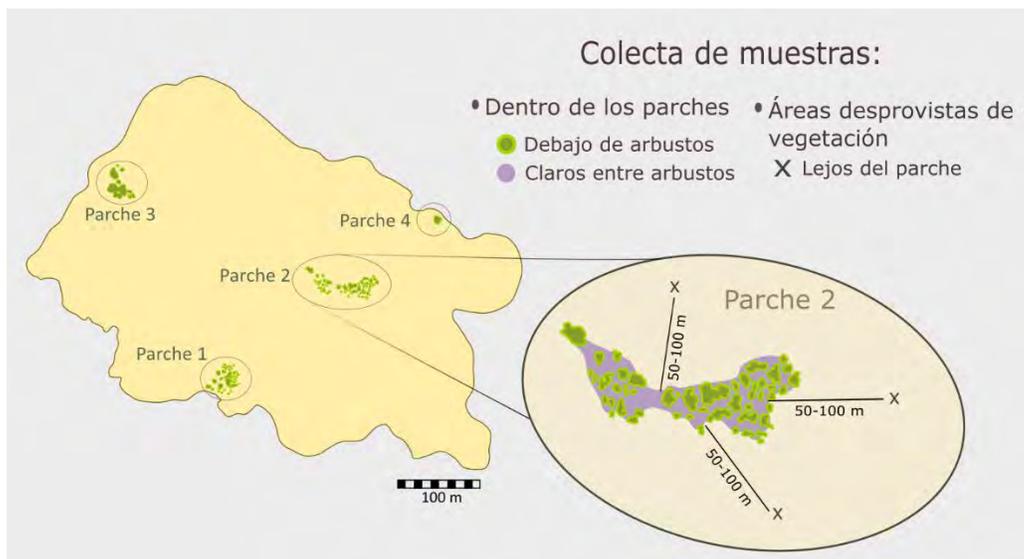


Figura 3. Localización de los parches de vegetación en el depósito de jales de Nacozari y esquematisación de la colecta de muestras para el análisis de materia orgánica y nutrientes.

Posterior a la colecta, se prepararon las muestras de jal para su análisis. Se homogenizaron las muestras compuestas y se redujo el tamaño de sus partículas moliéndolas. Para ello las muestras fueron secadas a la intemperie en las instalaciones de la Estación Regional del Noroeste (ERNO) del Instituto de Geología de la UNAM. Una vez secas, en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la ERNO, las muestras fueron trituradas con una quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk; posteriormente, pulverizadas con una pulverizadora Bico Braun tipo UA; y finalmente, tamizadas con una malla de 500 μ m para verificar que su tamaño fuera el correcto para los análisis.

7.2.2. Análisis de materia orgánica y nutrientes

La materia orgánica en el suelo, generalmente, se determina por el contenido de carbono orgánico presente. Sin embargo, éste representa un gran porcentaje del carbono total (orgánico e inorgánico) que hay en el suelo (Dungait et al., 2012). Por esta razón, en este trabajo los resultados obtenidos de CT se utilizaron para inferir la concentración de materia orgánica en las muestras analizadas.

El contenido de CT y NT se determinó en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM, por el método de combustión completa, mediante un analizador elemental CHNS/O PerkinElmer 2400 serie II, en el modo CHN. El procedimiento se basa principalmente en la conversión de los elementos a gases simples por medio de la combustión, los cuales son acarreados por helio a través de unas columnas especiales y un detector de conductancia térmica, donde es captada la señal de los elementos. El contenido de CT y NT se expresa de manera porcentual respecto al peso de la muestra (PerkinElmer Inc., 2005). Para esto, antes de analizar las muestras, el analizador elemental debe ser calibrado analizando sustancias puras con una concentración conocida de nitrógeno. En este caso se empleó acentanilia como estándar de calibración; y la cantidad de muestra utilizada en el análisis fue de ≈ 15 mg.

El contenido de FD se analizó a través del método de Bray-P1, en el Laboratorio de Suelos del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora. Este método se basa en la extracción de las formas de fósforo fácilmente solubles, utilizando ácido clorhídrico y fluoruro de amonio (van Reeuwijk, 1992). La cuantificación se lleva a cabo por colorimetría, empleando molibdato de amonio y cloruro estanoso que dan una coloración azul a la solución de fósforo soluble; finalmente ésta es leída mediante un espectrofotómetro, y el contenido de fósforo soluble o disponible se expresa en mg/Kg. La cantidad de muestra utilizada en el análisis fue de ≈ 5 g.

7.3. Diseño de experimentos con adición de composta

Se realizaron dos experimentos de establecimiento de plantas con potencial fitoestabilizador abundantes en los parches de vegetación (en condiciones controladas y condiciones de campo), bajo tratamientos con diferentes concentraciones de jal y composta (mezclas de jal-composta). En dichos experimentos se evaluó si la adición y el aumento en la concentración de composta

en el jal, reflejaban una mejoría en la respuesta en el establecimiento y crecimiento de las plantas y otros parámetros medidos.

7.3.1. Composta

Se decidió elaborar nuestra propia composta con el fin de tener el control de las características finales como es el contenido de nutrientes, relación C/N y pH de la composta a utilizar en los experimentos. Además de que la elaboración de ésta, podría servir como guía tanto para las autoridades pertinentes como para los habitantes de Nacozari, que desearan implementar un proyecto de fitoestabilización asistida con composta y así contribuir en la mitigación de la dispersión hídrica y eólica de los jales al medio circundante.

7.3.1.1. Proceso de compostaje

El proceso de compostaje se basa en la descomposición aerobia de materiales orgánicos ricos en nutrientes (principalmente carbono y nitrógeno) en condiciones específicas de humedad, aireación y temperatura (Labrador-Moreno, 2002; Moreno-Casco, 2008). Debido a que la descomposición aerobia es un proceso exotérmico, produce energía en forma de calor, lo que resulta en un incremento de la temperatura. Con base en este incremento o descenso de temperatura (cuando la descomposición aumenta o cesa) el proceso de compostaje se puede dividir principalmente en cuatro fases: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración (Figura 4) (Labrador-Moreno, 2002; Díaz et al., 2007; Moreno-Casco, 2008; Torres-Cedillo, 2015), las cuales se describen a continuación:

Fase mesófila: en un principio, el material orgánico en la pila del compostaje se encuentra a temperatura ambiente, posteriormente ésta empieza a ascender hasta 45 °C debido a la acción de bacterias y hongos mesófilos que colonizan el material orgánico. Estos organismos consumen los carbohidratos y proteínas más fácilmente degradables, generando ácidos orgánicos que vuelven más ácido el pH (4.5-5) de la pila de compostaje (Moreno-Casco, 2008; Nieto-Garibay et al., 2013).

Fase termófila: la actividad por microorganismos mesófilos disminuye a un mínimo y es remplazada por microorganismos termófilos, debido a un aumento de temperatura mayor a 45 °C (Díaz et al., 2007; Nieto-Garibay et al., 2013; Campitelli et al., 2014). En el inicio de esta fase, cuando ya han sido consumidos los nutrientes más fácilmente degradables, los microorganismos

termófilos comienzan a metabolizar proteínas, incrementando la liberación de amoníaco, lo que promueve una alcalinización del medio (pH 7.5-8.5) (Sánchez-Monedero, 2001). También en esta fase se llegan a metabolizar moléculas como lignocelulosa (Tuomela et al., 2000). Como consecuencia de la descomposición de dichos polímeros se liberan nuevas sustancias monoméricas simples que pueden ser utilizadas por otros microorganismos, la actividad microbiana, por lo tanto, continúa siendo intensa y la temperatura sigue incrementándose hasta superar los 60 °C. Inclusive, la temperatura puede ser mayor a los 70 °C, lo cual no es muy recomendable en un periodo mayor a 3 días, ya que podría matar a bacterias y hongos benéficos en esta etapa. Sin embargo, las altas temperaturas también (> 55 °C) ayudan a que ocurra el proceso de higienización de la composta, ya que el calor generado elimina bacterias de origen fecal, quistes y huevos de helmintos, esporas de hongos fitopatógenos, incluso semillas de malezas que pudieran encontrarse en el material orgánico implementado (Román et al., 2013). El que se alcancen temperaturas tan altas dependerá del material orgánico y de la adecuada aireación en la pila de compostaje (Nieto-Garibay et al., 2013). Las tasas de descomposición en esta fase son relativamente elevadas comparadas con las de la fase anterior (Moreno-Casco, 2008).

Fase de enfriamiento: los nutrientes comienzan a escasear, en especial el nitrógeno, por ende, la actividad de los microorganismos termófilos disminuye, y consecuentemente también la temperatura. Este descenso en la temperatura provoca la muerte de los microorganismos termófilos, y al bajar a los ≈ 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad descomponiendo polímeros como la celulosa; el pH del medio desciende levemente, aunque en general se mantiene ligeramente alcalino (Román et al., 2013; Campitelli et al., 2014). A diferencia de los microorganismos de la fase termófila, éstos no elevan tanto la temperatura de la pila de compostaje.

Fase de maduración: en esta última fase del proceso la descomposición se vuelve más lenta, el calor decrece hasta alcanzar la temperatura ambiente y el pH se neutraliza (pH 7) (Campitelli et al., 2014). Finalmente, se producen reacciones químicas más complejas (condensaciones y polimerizaciones de compuestos carbonados) dando lugar a la formación de compuestos similares al humus en el suelo (material orgánico estabilizado), que en conjunto conforman lo que se conoce como composta (Moreno-Casco, 2008; Román et al., 2013; Campitelli et al., 2014).

En relación con los cambios físicos que sufre el material orgánico empleado en la composta, se observan tanto en su color, olor y textura. Durante los primeros días del proceso, el volumen del material disminuye $\approx 40\%$, se torna de un color oscuro, y el olor es fuerte y putrefacto debido al proceso de descomposición que ocurre en la primera fase. En el transcurso del proceso el material pierde su aspecto original para tornarse cada vez más oscuro, menos húmedo y más homogéneo. En la fase final, el color es café negruzco, la textura es terrosa y el olor es similar al de la tierra húmeda (Nieto-Garibay et al., 2013).

El éxito del proceso de compostaje dependerá del manejo y cuidado que se le dé al material orgánico, en relación con los parámetros de temperatura, humedad del sustrato, aireación, pH y relación C:N, que influyen en el crecimiento y reproducción de los microorganismos que llevan a cabo el proceso de descomposición (Moreno-Casco, 2008; Nieto-Garibay et al., 2013; Román et al., 2013).

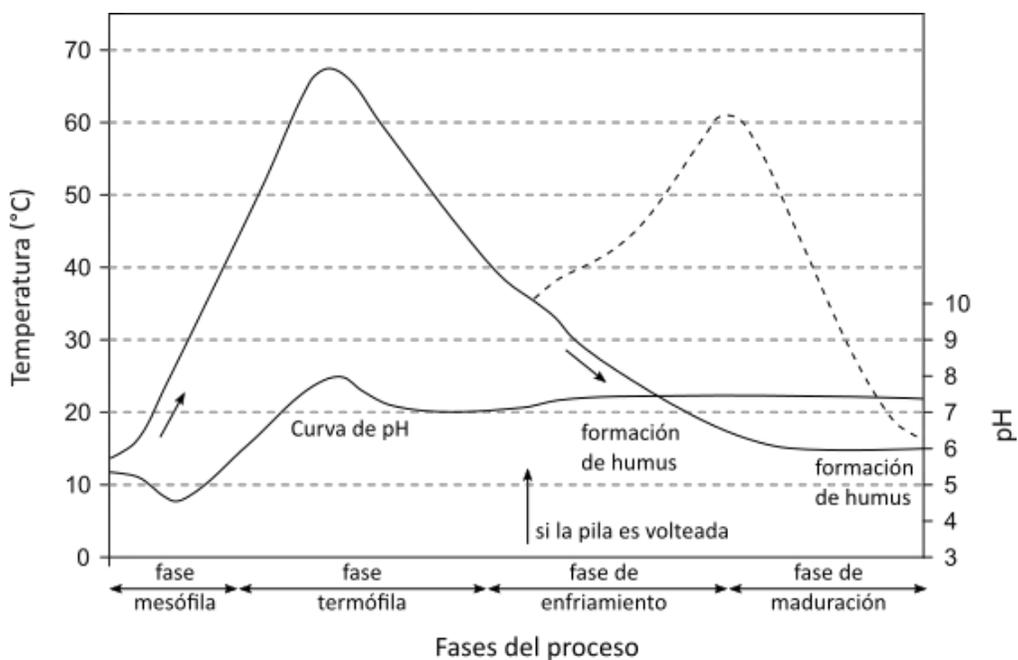


Figura 4. Fases del proceso de compostaje, mostrando los cambios de temperatura y de pH (modificado de Labrador-Moreno, 1996).

El rango de temperatura óptimo estará en función de la fase en que se encuentre el proceso. Sin embargo, es deseable que la temperatura no descienda muy rápido, ya que, a

mayor temperatura y tiempo, mayor será la velocidad de descomposición y el proceso de higienización.

La humedad del sustrato óptima se sitúa entre el 45 y 60 %, aunque varía dependiendo del estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje (en contenedor, fosa o sobre el suelo). Si la humedad alcanza valores por debajo de 45 %, la actividad microbiana disminuye, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de descomposición, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (> 60 %) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material.

La necesidad de oxígeno o aireación de los microorganismos varía durante el proceso, alcanzando la mayor tasa de consumo durante la fase termófila. El rango ideal se encuentra entre el 5 y 15 %. No obstante, la aireación también es necesaria para mantener los parámetros de temperatura y humedad dentro de los rangos óptimos.

El pH en el proceso de compostaje depende de los materiales de origen y varía según cada fase del proceso. El rango óptimo de pH para el desempeño de los microorganismos es entre 4.5 y 8.5.

La relación de carbono/nitrógeno (C/N) ideal del material orgánico empleado para la elaboración de la composta comprende valores entre 25 y 35 partes de carbono por 1 de nitrógeno (Moreno-Casco, 2008; Nieto-Garibay et al., 2013), aunque hay autores que consideran que el rango ideal debería de ser entre 45 y 60 (Labrador-Moreno, 2002). El exceso de cualquiera de los dos nutrientes traerá consecuencias negativas al proceso de compostaje, alentando el proceso o impidiendo la correcta actividad biológica. A pesar de ello, durante el proceso de compostaje la relación C/N tiende a disminuir, llegando a la fase de maduración 2/3 menos de su valor inicial, debido a la producción de CO₂ en la descomposición del material orgánico. La relación C/N óptima para una composta totalmente madura es entre 10 y 20 partes de carbono por 1 de nitrógeno, similar a la del humus (Moreno-Casco, 2008). Una composta madura con una relación de C/N muy alta, puede repercutir en su calidad y afectar futuros usos; por ejemplo, puede afectar el establecimiento de plantas donde se utilice esta composta, debido a una inmovilización del nitrógeno por parte de los microorganismos en el suelo, que “hambrientos” después de consumir el carbono presente en el material, incrementan el consumo de nitrógeno, agotando las reservas de este nutriente en el suelo (van Rensburg & Morgenthal, 2004; Román et al., 2013).

Por último, es importante mencionar que el material orgánico que no haya terminado el proceso de compostaje correctamente, puede resultar fitotóxico; debido a que el nitrógeno en el material orgánico resultante puede estar presente en forma de amonio (en vez de nitrato), que con el calor y la humedad reacciona transformándose en amoniaco, creando un medio tóxico para las plantas. Además, este material también puede contener compuestos químicos inestables como ácidos orgánicos, que resultan tóxicos para semillas y plantas (Román et al., 2013).

7.3.1.2. Método de elaboración de la composta

El método para producir este tipo de abono orgánico es económico y fácil de implementar. Prácticamente cualquier material de origen vegetal o animal que haya estado vivo, o bien, que sea un desecho de cualquier ser vivo puede descomponerse durante el proceso de compostaje (Nieto-Garibay et al., 2013). Sin embargo, es importante tener en cuenta el contenido de carbono y nitrógeno que presentan estos materiales al momento de su elección, y la cantidad o proporción que se utilizará de estos para elaborar la composta.

Posteriormente el material orgánico elegido puede ser apilado en capas sobre el suelo, dentro de una fosa o un contenedor; mientras se arma la pila de material, es necesario añadir bastante agua entre capa y capa, y preferentemente al finalizar el armado de la pila de material, esta debe ser cubierta con un plástico para conservar la humedad. Por último, se recomienda llevar un registro continuo de los parámetros de temperatura, humedad y pH, para verificar que el proceso de compostaje ocurra de una manera correcta. En dado caso que los parámetros estén fuera de los rangos óptimos, se pueden manipular la humedad, la aireación e incluso la relación C/N; añadiendo más agua, destapando la pila de compostaje, volteando el material, o añadiendo más material orgánico rico en determinado nutriente (C, N). La duración del proceso de compostaje puede variar en cuanto a las condiciones climáticas del lugar, por los materiales empleados en la elaboración de la composta, el volumen del material y el cuidado o manejo de los parámetros; sin embargo, un tiempo estimado para un proceso adecuado en climas cálidos es entre 3 y 4 meses (Nieto-Garibay et al., 2013; Torres-Cedillo, 2015).

7.3.2. Elaboración de la composta

Para la elaboración de nuestra composta, se eligieron estiércol seco de bovino, aserrín seco y recortes de hierbas (mezcla de hierbas que crecen como maleza) como material orgánico a utilizar; tomando en cuenta que este material puede ser considerado de desecho y de fácil

adquisición para los habitantes del poblado de Nacoziari. Con base a su contenido de C y N (Tabla 3), los materiales seleccionados se implementaron en las siguientes proporciones respecto al volumen total de material orgánico añadido: 20 % correspondió a aserrín, 33 % a estiércol y 47 % a los recortes de hierbas. Además del material orgánico, es recomendado añadir un poco de tierra en la preparación de la composta; es por ello que, del volumen total del material utilizado para la composta, 12 % correspondió a suelo colectado del traspatio de las instalaciones de la ERNO. El suelo empleado presentaba textura franca.

La composta se elaboró en una fosa que se cavó en el traspatio de dichas instalaciones, con dimensiones de 2 x 2 x 1 m de largo, ancho y profundidad. El material se dispuso en capas de diferentes grosores, llenando la mitad de la fosa y dejando la otra mitad libre para poder voltear el material en el momento pertinente. La primera capa consistió en 2 cm de profundidad rellena de suelo, la siguiente capa fue de 7 cm de los recortes de hierbas; consecutivamente se colocaron 3 cm de aserrín seco y al final 5 cm de estiércol bovino seco. Cada capa de material fue humedecida a saturación. En total se colocaron 3 repeticiones del conjunto de capas, formando la pila del material. Finalmente se cubrió la fosa con un plástico negro de invernadero.

Durante todo el proceso se registraron continuamente los parámetros de humedad, pH y temperatura. Se midió la humedad relativa del material en descomposición por medio de la técnica del puño (Nieto-Garibay et al., 2013; Román et al., 2013). El pH se midió directamente con papel pH; y se registró la temperatura del material en descomposición, además de la temperatura ambiental (a manera de control, a 1.30 m de altura del suelo), por medio de un termómetro de laboratorio.

Tabla 3. Contenido de nitrógeno y carbono de material orgánico utilizado para elaborar composta.

Material orgánico	N (%)	C/N
Estiércol seco de bovino almacenado	ND	15 – 20
Aserrín	0.1	200 – 500
Recortes de hierba	3 – 6	12 – 15

ND= No determinado, C/N= proporción carbono/ nitrógeno. Fuentes: Díaz et al., 2007 y Nieto-Garibay et al., 2013.

Los primeros días del proceso la humedad fue excesiva, debido a la adición de agua en el día 0 (cuando se armó la pila de material), además de la ocurrencia de lluvias intensas que aumentaron la humedad en el material. Posterior a este período, se añadió agua cuando fue necesario, para controlar la humedad dentro de los rangos óptimos (Figura 5).

Con base en lo establecido por Nieto-Garibay et al., 2013 y Torres-Cedillo, 2015 el primer volteo del material en descomposición se llevó a cabo el día 20 después del apilamiento; además, se aprovechó para añadir más estiércol (material orgánico rico en N), debido a que el aumento de temperatura del material en descomposición no había superado los 35 °C. Posteriormente, el material en descomposición se volteó cada 7 días hasta el día 45. Después de este día se decidió dejar un periodo sin aireación para permitir que la temperatura aumentará más de lo que había alcanzado (≈ 50 °C), llegando a los ≈ 60 °C. Posteriormente, la temperatura descendió hasta los 40 °C, y de nuevo se aireó el material el día 82; posterior a este, el material se estuvo volteando cada 15 días hasta que el material mostró las características de una composta madura. El periodo de elaboración constó de ≈ 4 meses (Figura 5). Por último, la composta fue guardada en costales de nylon en un lugar oscuro y de poca humedad.

Las características de la composta madura (nutrientes, relación C/N, pH y CE) se muestran en la Tabla 4. Los nutrientes (CT, NT y PD) se analizaron bajo el mismo procedimiento que las muestras de jales, por combustión y colorimetría (ver apartado 7.2.2). El pH y la CE se determinaron en una solución de 1:2.5 p/v de composta en agua desionizada (agitada por 18 h previa a la lectura), y se leyeron con una sonda de pH (potenciómetro) y de CE (puente de conductividad) con un equipo de mediciones electroquímicas WTW LF90, en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM. Mayores detalles del método de la medición de pH y CE se darán en el apartado 7.6.2.

Tabla 4. Características de la composta madura elaborada para este trabajo en las instalaciones de la Estación Regional del Noroeste (ERNO) del Instituto de Geología, UNAM.

Composta	CT (%)	NT (%)	PD (%)	C/N	pH	CE (mS/cm)
	6.67	0.58	0.0093	11.49	8.44	4.01

CT= carbono total, NT= nitrógeno total, PD= Fosforo disponible, C/N= proporción carbono/nitrógeno, CE= conductividad eléctrica.

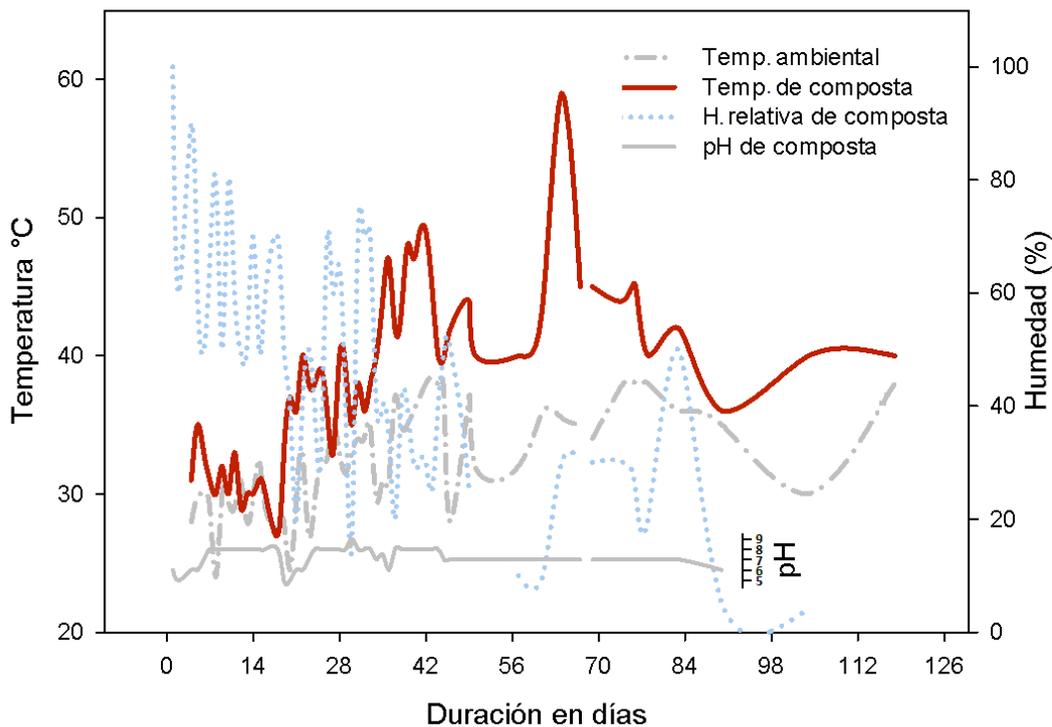


Figura 5. Parámetros medidos durante el proceso de compostaje. La maduración de la composta duró 126 días.

7.3.3. Experimento bajo condiciones controladas.

Se establecieron plantas de *A. farnesiana* y *P. velutina* bajo cuatro tratamientos con cinco repeticiones de diferentes concentraciones de composta (0, 2.5, 5 y 10 % p:p) mezcladas con jal del depósito de jales de Nacozari y un tratamiento control de suelo natural del mismo pueblo. El material de jales empleado se colectó en una zona plana de la parte central del depósito, y el suelo natural se colectó aledaño al depósito de jales. Ambos materiales de sustrato se colectaron a una profundidad de 0 a 0.5 m. El experimento se realizó en el periodo de lluvias del verano (julio-septiembre) del 2015, en el traspatio de las Instalaciones de la ERNO y tuvo una duración de 71 días.

Los tratamientos de las mezclas (jal-composta) se prepararon en una tina de 200 L, la composición de las mezclas se realizó con base a una relación peso de jal/peso de composta. El peso de una maceta de 1 gal (19 cm de diámetro x 15 cm de altura) llena de puro jal (2.5 Kg) representaba el 100 %. Por ejemplo, en el tratamiento 10 % composta se empleó 0.25 Kg de composta y 2.25 Kg de jal para una maceta, sin embargo, como las mezclas se preparaban para

el total de repeticiones y especies, entonces se utilizaba $0.25 \times 5 \times 2 \text{ Kg} = 2.5 \text{ Kg}$ de composta, y $2.25 \times 5 \times 2 \text{ Kg} = 22.5 \text{ Kg}$ de jal. Por último, las mezclas se homogenizaban con una pala metálica, revolviendo el material durante $\approx 5 \text{ min}$. El llenado y la distribución final de las macetas fue realizado por cada tratamiento en macetas del mismo peso.

Las semillas empleadas en el experimento también fueron colectadas en Nacozari. Las semillas de *A. farnesiana* se colectaron de arbustos dentro de los parches de vegetación del depósito de jales, mientras que las de *P. velutina* de plantas creciendo fuera del depósito de jales. Previo a la siembra, las semillas fueron escarificadas mediante un proceso manual, utilizando papel de lija de madera. Inmediatamente después de la escarificación, se llevó a cabo la siembra en las macetas previamente llenadas y regadas a capacidad de campo. En un principio se sembraron dos semillas por réplica para asegurar que al menos una semilla germinará y se estableciera el establecimiento de un individuo. Sin embargo, debido a que en algunos tratamientos no se estableció ningún individuo por replica, se llevó a cabo una resiembra con cinco semillas por replica (sólo en las réplicas donde no había planta). Posterior a los 20 días de haber emergido las plántulas, se llevó a cabo un aclareo de las réplicas, dejando un individuo por maceta. Durante todo el tratamiento, las macetas estuvieron expuestas al sol y a temperatura ambiente, además, se regaron diariamente, a excepción de los días que llovía y/o había mucha humedad en las macetas.

7.3.4. Experimento bajo condiciones de campo

Este experimento se realizó durante el periodo de lluvias de verano (agosto-septiembre) del 2016, en una planicie del depósito de jales de Nacozari; consistió en el establecimiento de *A. farnesiana* y *P. velutina* sembradas en hoyos preparados con 3 tratamientos de diferentes concentraciones de composta (0, 10 y 20 %) mezcladas con jal. En este experimento también se evaluó el efecto de la composta más jal y sin plantas, por lo que también se prepararon hoyos con los mismos tratamientos de concentración de composta, pero sin siembra. Cada tratamiento contó con 10 repeticiones; y el experimento tuvo una duración de 42 días.

Los hoyos se cavaron manualmente con ayuda de una barrena, barra y pala, con dimensiones de 10 cm de diámetro y 30 cm de profundidad. Los hoyos se distribuyeron en 18 filas y 5 columnas, con una separación de 50 cm entre cada uno de los hoyos para evitar contaminación entre tratamientos (Figura 6); el área total donde se realizó el experimento consistió de un cuadrante de 4.50 m de ancho y 12.30 m de largo. Las mezclas se prepararon en

campo con el jal contenido en los hoyos y la composta, y al igual que las mezclas del primer experimento, se realizaron con base a una relación peso de jal/peso de composta, tomando como 100 % el peso del contenido de jal en un hoyo (3.30 Kg). Las mezclas también se prepararon en conjunto para el total de repeticiones, especies y tratamientos sin siembra, dentro de una tina de 200 L. Por ejemplo, para el tratamiento de 10 % de composta se empleó $0.33 \text{ Kg} \times 10 \times (2+1) = 9.9 \text{ Kg}$ de composta y $2.97 \text{ Kg} \times 10 \times (2+1) = 89.1 \text{ Kg}$ de jal. De la misma manera las mezclas se homogenizaron con una pala metálica, revolviendo el material durante ≈ 15 min. El llenado de los hoyos y la distribución de los tratamientos fue bajo un diseño completamente al azar.

Las semillas empleadas precedían del mismo sitio que las utilizadas en el primer experimento (semillas de *A. farnesiana* dentro del depósito de jales y *P. velutina* fuera del depósito), y previo a la siembra se empleó el mismo tratamiento de escarificación. Posterior a la escarificación se sembraron 3 semillas por especie por hoyo (con tratamiento con siembra), en los hoyos previamente llenados y regados. Después de la siembra los hoyos fueron regados nuevamente, con abundante agua, y posteriormente los requerimientos de agua se dispusieron a las condiciones climáticas (precipitación) durante el resto del experimento (Figura 7). No obstante, en el transcurso de este experimento, se realizaron 6 visitas control, donde se aprovechaba para añadir ≈ 2 L de agua por hoyo en cada visita, si era necesario.

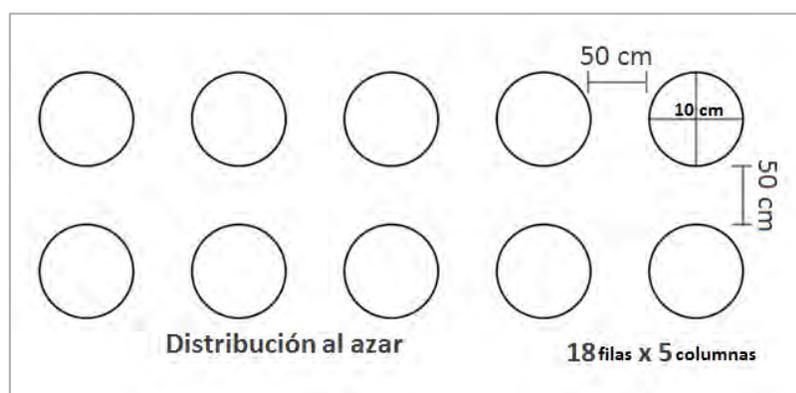


Figura 6. Esquema de la distribución de los tratamientos en el experimento bajo condiciones de campo.

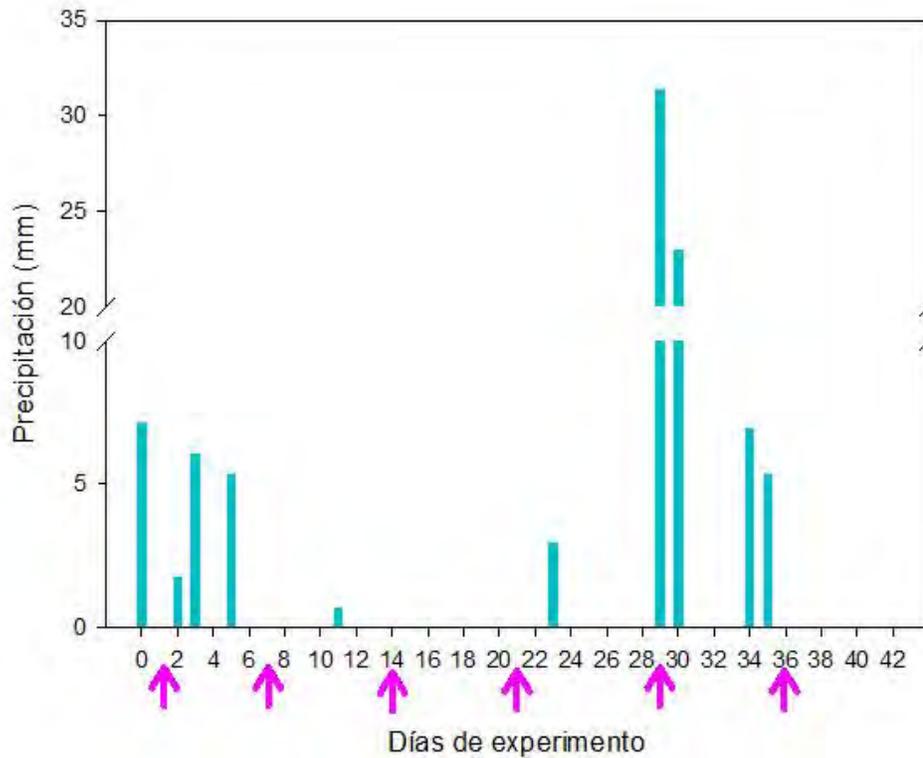


Figura 7. Precipitación durante el experimento en campo. Las flechas rosas indican las visitas a la zona de estudio, en las cuales se añadía agua si era necesario (2L por hoyo).

7.4. Evaluación de germinación y establecimiento de especies vegetales utilizadas en los experimentos

Las de germinación y establecimiento en ambos experimentos se evaluaron por especie y tratamiento en porcentajes. La germinación se determinó tomando en cuenta el número total de semillas sembradas por maceta o por hoyo, y el número total de plántulas emergidas; el resultado se expresó en porcentaje.

El establecimiento se determinó tomando en cuenta el número total de plántulas emergidas y el número total de individuos establecidos, a los 49 días en el experimento bajo condiciones controladas, y a los 42 días en el experimento bajo condiciones de campo; de igual manera el resultado se expresó en porcentaje.

7.5. Evaluación de la respuesta de las plantas establecidas en ambos experimentos

La respuesta de las plantas también se evaluó por especie y tratamiento en cada experimento. La altura de las plantas se midió *in situ* en las macetas u hoyos antes de la cosecha, desde la base del tallo hasta la yema apical, utilizando una cinta métrica.

Posterior a la cosecha (a los 49 días en el experimento bajo condiciones controladas y 42 días en el experimento bajo condiciones de campo) las plantas se lavaron con HCl (0.1 %) y agua destilada; después se seccionó cada individuo en hojas, tallo y raíz, con ayuda de un cúter, y cada sección se guardó en bolsas de papel estraza. Consecutivamente, las partes de las plantas se dispusieron a secar, en el caso de los individuos crecidos bajo condiciones controladas en un horno a 65 °C por 72 h, en el Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional del Instituto de Ecología de la UNAM, campus Hermosillo; y las plantas bajo condiciones de campo, en una explanada expuesta al sol a temperatura ambiente (\approx 25-45 °C) por 120 h, en las instalaciones de la ERNO. Una vez secas, en el laboratorio se determinó el peso seco de hojas, tallo y raíz, utilizando una balanza analítica. Además, se estimó la relación raíz/biomasa aérea, la cual consiste en la razón entre el peso seco de la raíz y el peso seco total de la parte aérea de la planta (tallo + hojas).

En el caso de los individuos crecidos en condiciones de campo, también se les determinó el parámetro de área foliar (AF); éste se estimó utilizando el área foliar específica (AFE), es decir, la razón entre el área foliar y el peso seco de la hoja (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Para ello, de cada individuo se colectaron dos hojas (seleccionadas al azar, sanas y sin daño por herbívoros), las cuales se mantuvieron en hielo dentro de bolsas herméticas de plástico, con una sanita húmeda para conservar su humedad y tamaño. Posteriormente, cada hoja fue escaneada en fresco, junto con una referencia de 4 cm² de área; y la medición del área foliar se realizó por medio del software para analizar imágenes ImageJ 1.51h (National Institutes of Health, USA, 2017). Posterior a la medición de área foliar, las hojas fueron secadas y pesadas al igual que el resto de la biomasa de los individuos crecidos en campo. Consecutivamente, con el AF y los pesos secos, se calculó el promedio de AFE; y posteriormente con el peso seco total de las hojas por individuo se estimó el AF de cada planta, de acuerdo a la ecuación 7.1, cómo se muestra a continuación:

$$\text{Área foliar (AF)} = \frac{\text{Área foliar específica (AFE)}}{\text{Peso seco total de las hojas}} \quad (7.1)$$

7.6. Evaluación del efecto de los tratamientos experimentales y las plantas establecidas en parámetros químicos y biológicos

El efecto de los tratamientos experimentales y las plantas establecidas se evaluó en los parámetros químicos: a) pH, b) conductividad eléctrica (CE) y c) concentración de metales en el sustrato. Además, se evaluó el efecto de los tratamientos en los parámetros biológicos: d) concentración de algunos metales en el tejido vegetal, e) factor de acumulación de los metales y f) actividad microbiana en el sustrato. Las evaluaciones tanto de parámetros físicos como químicos se realizaron por tratamientos y por especie.

7.6.1. Colecta y preparación de muestras

Para la evaluación de los parámetros mencionados se realizaron diferentes análisis, los cuales requirieron muestras de sustrato de los tratamientos experimentales y de tejido vegetal de las plantas establecidas en los diferentes tratamientos.

Las muestras de sustrato para los análisis de pH, CE, metales en el sustrato y actividad microbiana se tomaron del área de la rizósfera (zona del sustrato que está influenciada por el sistema radicular de las plantas) en el caso de los tratamientos con siembra, y en el caso de los tratamientos sin siembra, se tomó una muestra homogénea de sustrato a una profundidad de 0 a 10 cm. Las muestras fueron almacenadas en bolsas herméticas de plástico; y además, las muestras para pH, CE y actividad microbiana fueron colocadas dentro de bolsas de plástico negras y se mantuvieron en refrigeración ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta el momento de su respectivo análisis.

Las muestras colectadas para el análisis de los metales en el sustrato, en particular las muestras del experimento bajo condiciones controladas, se secaron en un horno a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 h; mientras que las de condiciones de campo, se secaron a la intemperie, en la misma explanada donde se secó la biomasa de las plantas crecidas en el experimento bajo condiciones de campo, a una temperatura ambiente de $\approx 25\text{-}45\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 336 h. Posterior al secado, en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la ERNO las muestras se pulverizaron con un molino de bolas de ágata Retsch S100, y se pasaron por un cernidor de $100\text{ }\mu\text{m}$, para verificar que el tamaño de las partículas fuera el correcto para el análisis.

Las muestras de tejido vegetal para el análisis de la concentración de metales, se tomaron de la biomasa seca aérea cosechada en los diferentes tratamientos experimentales. Las muestras de tejido vegetal del experimento bajo condiciones controladas estuvieron constituidas solamente de las hojas de cada individuo, en tanto, las del experimento bajo condiciones de campo estuvieron compuestas de las hojas y el tallo de cada individuo, debido a la poca formación de biomasa foliar.

Además de la evaluación del impacto de los tratamientos experimentales en la concentración de metales en los tejidos aéreos de las especies estudiadas, también se analizó la concentración de metales en muestras de tejido foliar de individuos adultos de las mismas especies, crecidos en los parches de vegetación del depósito de jales. Para ello se seleccionaron tres individuos adultos por especie, distribuidos en los distintos parches, y de cada uno se colectaron tres hojas al azar, las cuales tuvieron el mismo tratamiento de lavado y secado que las muestras de la biomasa cosechada en los experimentos.

Posteriormente, todas las muestras de tejido vegetal fueron pulverizadas. Sin embargo, a diferencia de las muestras de sustrato, éstas se pulverizaron manualmente con un mortero de ágata en el Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional. De igual manera, también se verificó que el tamaño de las partículas fuera el adecuado para el posterior análisis, no obstante, éste se verificó a través del tacto y con ayuda de una espátula.

7.6.2. Análisis de pH y Conductividad Eléctrica

El análisis para la evaluación del pH se llevó a cabo con un electrodo selectivo de iones (ISE) (potenciómetro), que produce un potencial eléctrico proporcional a la concentración de H^+ , el cual se determina a través del voltaje producido. Por otra parte, la conductividad eléctrica representa la concentración de sales solubles totales en el medio, y es medida por medio de un puente de conductividad eléctrica que determina el flujo eléctrico en el medio acuoso, el cual depende de la presencia de iones en solución, su movilidad, valencia y temperatura (Ponce de León-Hill et al., 2012).

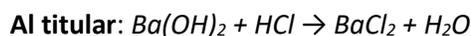
La determinación de pH y CE se realizó sólo en muestras de los tratamientos experimentales bajo condiciones de campo, del inicio y final del experimento (42 días después de haberse montado). Las muestras del inicio se colectaron de las mezclas de los tratamientos recién hechas, mientras que las del final se tomaron de los tratamientos sin sembrar y de la rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los tratamientos de 10 y 20 % composta.

El análisis de ambos parámetros se llevó a cabo siguiendo la metodología para la determinación de pH y CE en extractos acuosos de suelo (Ponce de León-Hill et al., 2012). Para ello, previo a la medición, las muestras se pusieron en solución con agua desionizada, a una relación 1:10 p/v, y fueron agitadas por 18 h con un agitador magnético, en el Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional. Posteriormente, la medición se realizó con un equipo de mediciones electroquímicas VWR sympHony 830PCI, con un potenciómetro y un conductímetro; las cuales fueron calibradas antes de la medición, con soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10, y con una solución estándar para conductímetro de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. La cantidad de muestra utilizada en el análisis por tratamiento experimental fue de 3 g por réplica.

7.6.3. Análisis de actividad microbiana en el sustrato

La actividad metabólica de los microorganismos heterotróficos en el sustrato se infirió analizando la mineralización del carbono, mediante la respiración aeróbica (en donde el carbono es oxidado hasta CO_2), con base en el método para la determinación de la mineralización del carbono de Isermeyer (Isermeyer, 1952 y Alef, 1995).

Este método consiste en la adsorción del CO_2 generado por los microorganismos del suelo en una solución de NaOH, formando Na_2CO_3 ; donde la cantidad de CO_2 producido será equivalente a la cantidad de NaOH consumido. Para determinar lo anterior, el Na_2CO_3 (NaOH que reaccionó con el CO_2) se precipita como BaCO_3 adicionando BaCl_2 , y el remanente de NaOH que no reaccionó con el CO_2 se titula con HCl. A continuación, se muestra en las reacciones mencionadas:



De la diferencia entre la cantidad de NaOH presente inicialmente y la remanente después de la reacción con el CO_2 , medida por el gasto de HCl, se obtiene la cantidad de CO_2 producido por la respiración (Coleman et al., 1978), empleando la ecuación 7.2, como se muestra a continuación:

$$gC\ g^{-1} = \frac{\left(\frac{\text{Gasto HCl corregido} \cdot \text{Normalidad NaOH}}{2000}\right) \cdot 12}{\text{Proporción de peso seco}} \quad (7.2)$$

Dónde:

- gasto HCl corregido = (gasto HCl muestra - gasto HCl blanco)
- 2000 es la corrección para tener los moles de C como Na₂CO₃ existentes en un litro.
- 12 es el peso atómico del C

Para esto, el procedimiento del método consiste en colocar las muestras de sustrato previamente humedecidas con agua desionizada en tubos de policloruro de vinilo (pvc), los cuales son colocados junto con una trampa de CO₂ (contenedor con NaOH) dentro de frascos herméticos, y son incubados a ≈ 25 °C en ausencia de luz. Además, se colocan al menos tres frascos herméticos, sin muestras de sustrato, pero con su tubo de pvc y su trampa de CO₂, a manera de blancos en el procedimiento. Las trampas de CO₂ son recambiadas continuamente a través del experimento y posteriormente tituladas. La frecuencia del recambio depende de la precisión del análisis; sin embargo, es importante tener en cuenta que, al momento del recambio, las trampas se deben cerrar bien para que no entre CO₂ exterior al frasco y se disuelva en el NaOH. Para la titulación, a la sustancia contenida dentro de las trampas de CO₂ (NaOH y Na₂CO₃) se le añade BaCl₂ y fenoftaleína. La fenoftaleína es un indicador de color que vira de básico (color rosa fucsia) a neutro (incolore). Posteriormente, la titulación se lleva a cabo añadiendo HCl con una bureta, y se registra la cantidad de HCl gastado cuando la sustancia cambia de básico a neutro.

En este caso, el análisis de actividad microbiana se realizó en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM. La determinación se realizó en muestras de los tratamientos experimentales 0 y 20 % de composta con siembra y sin siembra bajo condiciones de campo, del inicio y final del experimento. La cantidad de muestra utilizada en el análisis de cada tratamiento experimental fue de 100 g por réplica. La incubación de las muestras tuvo una duración de 13 días y el recambio de las trampas de CO₂ fue cada 24 h. Finalmente, el resultado obtenido se expresó en $\mu\text{gC g}^{-1}$ acumulado por los 13 días.

7.6.4. Análisis de metales en el sustrato y en el tejido vegetal

Los análisis de metales tanto en muestras de sustrato y rizósfera, como en muestras de tejido vegetal de todos los tratamientos experimentales, se realizaron empleando espectrometría de emisión atómica. Las muestras del experimento bajo condiciones controladas se analizaron con la técnica de Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma por Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), mientras que las muestras del experimento bajo condiciones de campo, se analizaron con la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma por Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).

La espectrometría de emisión atómica consiste en la excitación de los electrones de valencia de los átomos presentes en la muestra; lo cual permite la identificación y determinación de la abundancia de los diferentes elementos, a través de distintas técnicas. En las técnicas con Plasma por Acoplamiento Inductivo (ICP), el plasma es la fuente de energía que excita a los electrones; el cual se genera sometiendo un flujo de gas plasmógeno (generalmente Ar) a la acción de un campo magnético oscilante, inducido por una corriente que oscila a alta frecuencia (Amador-Hernández, 2010). En el caso de la técnica de ICP-OES, posterior a la excitación de los electrones, la energía absorbida es liberada en forma de radiación, a longitudes de onda (λ) características de cada elemento, que finalmente es detectada y medida por un detector sensible a la luz (Amador-Hernández, 2010). Por otra parte, en la técnica de ICP-MS, después de la excitación, los átomos se hacen pasar por un analizador de masas, que separa los iones por su relación de masa y carga, que permite discernir entre elementos e inclusive entre isotopos; consecutivamente estos son detectados y cuantificados por un detector multiplicador de electrones (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013). Por último, la información de los detectores es procesada por un sistema informático, y el resultado es expresado en unidades de concentración de cada elemento o isotopo, según sea el caso. Para ambas técnicas, previo al análisis de las muestras, es necesario realizar una calibración del sistema empleando soluciones patrón con concentraciones conocidas. Además, las muestras a analizar deben estar en estado líquido; es decir que si se encuentran en estado sólido, deben pasar por un proceso de lixiviación o digestión (Amador-Hernández, 2010; Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Las muestras analizadas por ICP-OES fueron previamente digeridas siguiendo el Método de digestión ácida asistida con horno de microondas EPA-3051A, empleando HNO_3 y HCl concentrado, y un Horno de Microondas PerkinElmer Titan MPS, en el Laboratorio de Metrología del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora. Para el control de calidad en la digestión y posteriormente en el análisis de metales, se utilizaron los estándares certificados de sedimentos inorgánicos marinos (NIST-2702) y de hojas de manzano (NIST-1515) como material de referencia. Finalmente, el análisis de metales se realizó con un Espectrómetro PerkinElmer 4200 DV en el Laboratorio de Cristalografía y Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora; además, también como estándares de control de calidad se emplearon estándares certificados de aguas residuales (certified waste water standards) con diferentes concentraciones de una gran variedad de metales (NIST-CWW-TM-C, CWW-TM-F, CWW-TM-G y CWW-TM-H). La cantidad de muestra utilizada en el análisis

de cada tratamiento experimental fue menor a 0.5 g por replica. El resultado de la concentración de metales en cada muestra fue expresado en mg/Kg.

Las muestras analizadas por ICP-MS se prepararon de manera distinta según el tipo de muestra, en los Laboratorios de ALS Minerals (Vancouver, Canadá), donde posteriormente se realizó el análisis de metales por esta técnica. Las muestras de sustrato se procesaron según el método ME-MS03 de estos laboratorios, el cual consiste en la lixiviación de la muestra con agua desionizada y se digiere con un baño de agua termostático. Por otro lado, las muestras de tejido vegetal se procesaron según el método ME-VEG41, que consiste en una digestión con HNO₃ a diferentes temperaturas, y finalmente las muestras digeridas se llevan a un volumen conocido (afore) empleando HCl. Para el control de calidad por parte de estos laboratorios, se emplearon los estándares certificados de sedimentos de arroyo (CANMET-STSD-1) y de acículas de pino (NIST-1575A). En general, la cantidad de muestra utilizada por cada tratamiento experimental fue ≈ 1 g por replica. De igual manera que la técnica anterior, el resultado de la concentración de metales en cada muestra se expresó en mg/Kg.

Una vez realizados los análisis, con los resultados de los estándares certificados, se debe calcular el porcentaje de recuperación para validar que los procedimientos se hayan realizado de manera adecuada. Cabe resaltar que para calcular el porcentaje de recuperación es necesario que el procedimiento de descomposición y análisis de la muestra sea similar que el reportado para los estándares certificados. Así, el porcentaje de recuperación se calculó de acuerdo a la ecuación 7.3, de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de recuperación} = \frac{\text{Valor medido (resultado del analisis)}}{\text{Valor real (valores reportados para el estandar)}} * 100 \quad (7.3)$$

Se consideran aceptables los valores de porcentaje de recuperación entre el 85 y 115 %. En este caso, el procedimiento de descomposición y análisis de los estándares NIST-2702, 1515 y 1575A es propio para determinar el porcentaje de recuperación; sin embargo, el procedimiento de lixiviación con agua desionizada del estándar CANMET-STSD-1 no permite estimar el porcentaje de recuperación, a pesar de que la técnica de análisis es adecuada, ya que los valores reportados para este estándar son resultado de un método de extracción por digestión acida y digestión total.

7.6.4.1. Máximos Niveles Tolerables (MNT)

El Máximo Nivel Tolerable (MNT), se define como el nivel dietético que puede ingerir determinado animal de un mineral en particular por cierto tiempo sin afectar su rendimiento o estado de salud; posterior a este nivel, la ingesta de ese mineral se volverá tóxica en cierto grado para el animal (National Research Council, 2005).

Con los resultados del análisis de metales en las muestras de tejido vegetal del experimento bajo condiciones de campo y las muestras de los individuos adultos crecidos en los parches de vegetación, se comparó el contenido de los metales con los MNT reportados por The National Research Council (2005) para animales domésticos en Estados Unidos. Estos niveles reportados son basados en formas altamente solubles y otras formas que pueden tener baja biodisponibilidad de los metales; además, se basan en la suposición de que la exposición del animal a los metales por medios como el agua y otras fuentes ambientales es mínima. En la comparación se tomaron en cuenta los MNT reportados para ganado, ovejas y roedores, basándonos en que *A. farnesiana* y *P. velutina* pueden resultar palatables para este tipo de organismos.

7.6.4.2. Evaluación del factor de acumulación

El factor de acumulación o también conocido como factor de bioconcentración, es una manera de medir y expresar la acumulación de determinado metal en las plantas estudiadas. Éste se representa por el coeficiente del contenido de metales en tejidos aéreos de la planta y el contenido de metales en la rizósfera, se calculó de acuerdo a la ecuación 7.4, como se observa a continuación:

$$\text{Factor de acumulación} = \frac{\text{Concentración del metal en tejidos aéreos}}{\text{Concentración del metal en la rizósfera}} \quad (7.4)$$

Los valores del coeficiente mayores a 1 corresponden a especies que están acumulando determinado metal en sus tejidos aéreos, es decir que son fitoextractoras de ese metal; por el contrario, si el coeficiente es menor a 1, significa que la especie no está acumulando ese metal en sus tejidos aéreos, manteniéndolos en el área de las raíces o incluso en la rizósfera, a lo cual se le considera fitoestabilización (Brooks, 1998; Mendez & Maier, 2008).

7.7. Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos, previo a cada análisis se revisó la homogeneidad de varianzas y la normalidad sobre los residuales del modelo estadístico paramétrico aplicado, utilizando las pruebas de Levene y Shapiro-Wilk. Cuando los residuales no mostraron homocedasticidad, o no se ajustaron a la distribución normal, se probaron nuevamente con transformaciones de logaritmo natural e inversa. Sin embargo, cuando los residuales no cumplieron con los supuestos a pesar de la transformación, se analizaron con la versión no paramétrica de los análisis.

Se evaluó el efecto de la vegetación y la profundidad en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes en el depósito de jales. Para esto, se compararon los diferentes sitios (arbustos, claros entre arbustos y lejos del parche de vegetación) para una misma profundidad (0-10 y 10-20 cm) mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Posteriormente se realizó la prueba *post hoc* de Tukey HDS para evaluar posibles diferencias entre los diferentes sitios. Además, se realizó una comparación entre las diferentes profundidades para cada sitio mediante la prueba de t-Student.

En los experimentos bajo condiciones controladas y condiciones de campo, se evaluó el efecto de la adición y concentración de composta en el jal en el porcentaje de germinación y establecimiento de las plantas. Para esto, se compararon los tratamientos experimentales para una misma especie mediante la prueba de Chi-cuadrado, y posteriormente se exploró si existen diferencias con una comparación múltiple entre cada par de tratamientos. Además, usando esta prueba, se evaluaron las diferencias entre las especies para un mismo tratamiento.

Las respuestas de las plantas establecidas (biomasa, relación biomasa raíz/biomasa aérea, altura y área foliar) en los diferentes experimentos se compararon entre los tratamientos experimentales mediante un ANOVA de una vía para cada una de las especies. Cuando el ANOVA detectó diferencias significativas, se usó la prueba de Tukey HDS para identificar entre cuales tratamientos existen diferencias. También se compararon las respuestas entre las especies para un mismo tratamiento utilizando la prueba de t-Student. Esto permitió determinar cómo la concentración de composta en el jal influye en el crecimiento y asignación de biomasa en las especies estudiadas.

También se evaluó el efecto de la composta en los parámetros químicos (pH, CE y concentración de metales solubles en el sustrato) y biológicos (actividad microbiana en el sustrato y concentración de metales en el tejido vegetal aéreo). Así mismo, se evaluó el efecto de la exposición de los tratamientos a las condiciones de campo (sólo en pH, CE y actividad microbiana), y si el establecimiento de las especies modificó estos parámetros (en todos los tratamientos, excepto en la concentración de metales en tejido vegetal aéreo). Para todo esto se compararon los diferentes tratamientos experimentales utilizando un ANOVA de una vía o la prueba de t-Student según fuera el caso, en muestras tomadas en el mismo momento (inicio y final). Consecutivamente, posterior al ANOVA se evaluó si existían diferencias entre tratamientos empleando la prueba de Tukey HDS. Además, utilizando la prueba de t-Student se evaluaron las diferencias entre las especies para un mismo tratamiento. En el caso de la valoración del efecto de la exposición a las condiciones de campo de los tratamientos en los parámetros antes mencionados, se realizó haciendo una comparación entre las muestras tomadas al inicio y final del experimento mediante la prueba de t-Student para cada tratamiento.

Como se mencionó al principio de esta sección, cuando los residuales del modelo estadístico paramétrico aplicado no presentaron distribución normal a pesar de la transformación, se analizaron con la versión no paramétrica del análisis. Para ello, la prueba de t-Student se sustituyó por la prueba de Wilcoxon; el ANOVA de una vía se sustituyó por Kruskal-Wallis; y el análisis *pos hoc* con la prueba de Tukey HDS se sustituyó con una comparación múltiple entre cada par de la variable con la prueba de Dunn.

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico JMP (versión 10; SAS Institute, Cary, North Carolina, USA).

VIII. RESULTADOS

8.1. Materia orgánica del suelo y nutrientes en áreas con vegetación y desprovistas de vegetación en el depósito de jales.

El análisis de materia orgánica y nutrientes (CT, NT y PD) en las muestras de jal tomadas a diferentes profundidades dentro de los parches de vegetación (bajo los arbustos y en claros entre los arbustos), así como en áreas desprovistas de vegetación (lejos de los parches), mostró que en la capa más superficial (0-10 cm) es donde se encuentra la mayor proporción de materia orgánica y nutrientes (excepto para PD). Sin embargo, esta diferencia en el contenido de CT y NT entre las diferentes capas, fue significativa sólo en las muestras tomadas bajo los arbustos (Figura 8).

La concentración de nutrientes debajo de los arbustos fue mucho mayor que en el resto de las áreas muestreadas. El contenido de CT bajo los arbustos fue de 10 a 15 veces mayor que en los claros entre la vegetación y lejos de los parches de vegetación, respectivamente (Figura 8). Las concentraciones de NT sólo se pudieron cuantificar bajo los arbustos y los claros entre la vegetación, ya que las concentraciones lejos de los parches de vegetación se encontraban por debajo del límite de detección ($< 0.017\%$) del analizador elemental CNHS/o PerkinElmer 2400 Serie II; siendo debajo de los arbustos hasta 3 veces mayor que en los claros (Figura 8). En el caso del PD, no se encontró diferencia significativa entre la concentración de la capa más superficial y la más profunda, así como tampoco en las áreas con vegetación y desprovistas de ésta (Figura 8).

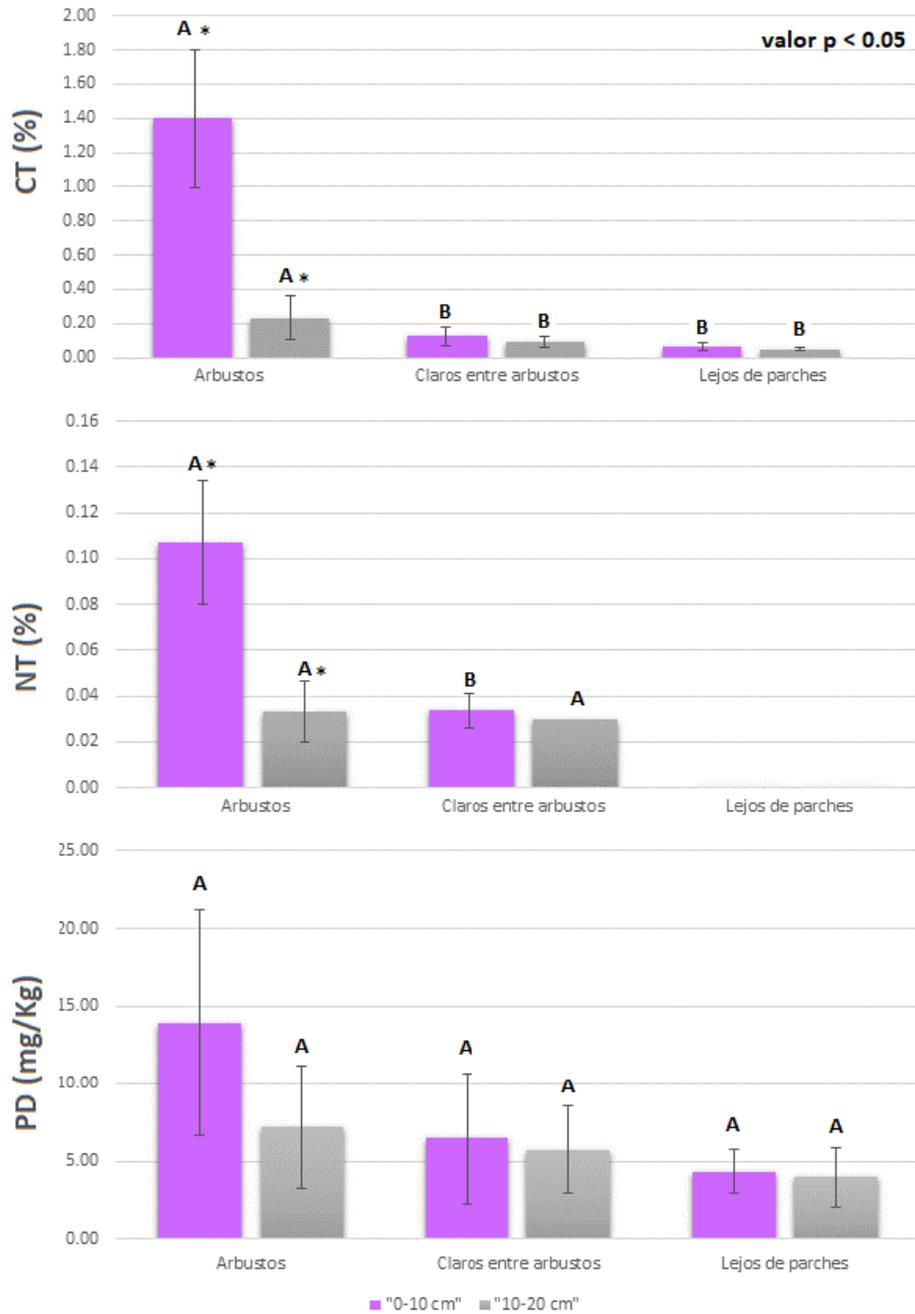


Figura 8. Concentración de CT, NT y PD en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, en capas diferentes profundidades. Letras diferentes representan diferencias significativas en la concentración de CT entre los diferentes sitios en una misma capa, mientras que asteriscos representan diferencias significativas entre las diferentes capas de un mismo sitio a una $p < 0.05$. Cuando no se indican asteriscos, se indica que no hubo diferencia significativa entre las especies. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos I-VI.

8.2. Germinación y establecimiento de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos de los experimentos.

8.2.1. Experimento bajo condiciones controladas

En el experimento bajo condiciones controladas, el porcentaje de germinación de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos de mezclas de jal-composta, fue del 60 al 100 % del total de las semillas sembradas. El aumento de composta entre los tratamientos experimentales (0, 2.5, 5 y 10 % composta) no mostró una clara diferencia en la germinación para ninguna de las especies. Sin embargo, se encontró que ambas especies respondieron de manera distinta en los tratamientos con mayor concentración de composta (5 y 10 %), siendo mayor la germinación de *A. farnesiana* (90-100 %) que *P. velutina* (67-69 %) (Figura 9).

En relación al establecimiento de las semillas germinadas para ambas especies, varió entre el 86 y el 100 %, sin mostrar diferencias significativas entre tratamientos, ni especies al finalizar el experimento (Figura 9).

8.2.2. Experimento bajo condiciones de campo

En el experimento bajo condiciones de campo, el porcentaje de germinación de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos de mezclas de jal-composta, fue del 33 al 77 % del total de las semillas sembradas. La adición de composta al jal mostró una mejoría en la germinación de *A. farnesiana*. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de 0 y 20 % composta, siendo el doble en el tratamiento de 20 %, que en el de 0 %. Mientras que la germinación de *P. velutina* no mostró diferencia significativa entre los tratamientos. No obstante, el análisis estadístico no mostró diferencia significativa entre la germinación de *A. farnesiana* y de *P. velutina* en cada uno de los tratamientos; esto puede estar relacionado con la variabilidad de los porcentajes de germinación de cada especie (Figura 9).

En relación con el establecimiento de las semillas germinadas para ambas especies, este varió entre el 0 y 53 %. El establecimiento en el tratamiento compuesto sólo por jal (0 % composta), fue nulo en ambas especies al finalizar el experimento en condiciones de campo. La adición de composta mejoró el establecimiento para ambas especies, pero esto sólo fue estadísticamente significativo para *P. velutina*, donde aumentó hasta un 50 % en el tratamiento de 20 % composta. De igual manera que en la germinación, el análisis estadístico no mostró

diferencia significativa en el establecimiento de las especies en los diferentes tratamientos, probablemente por la variabilidad de los porcentajes de cada especie (Figura 9).

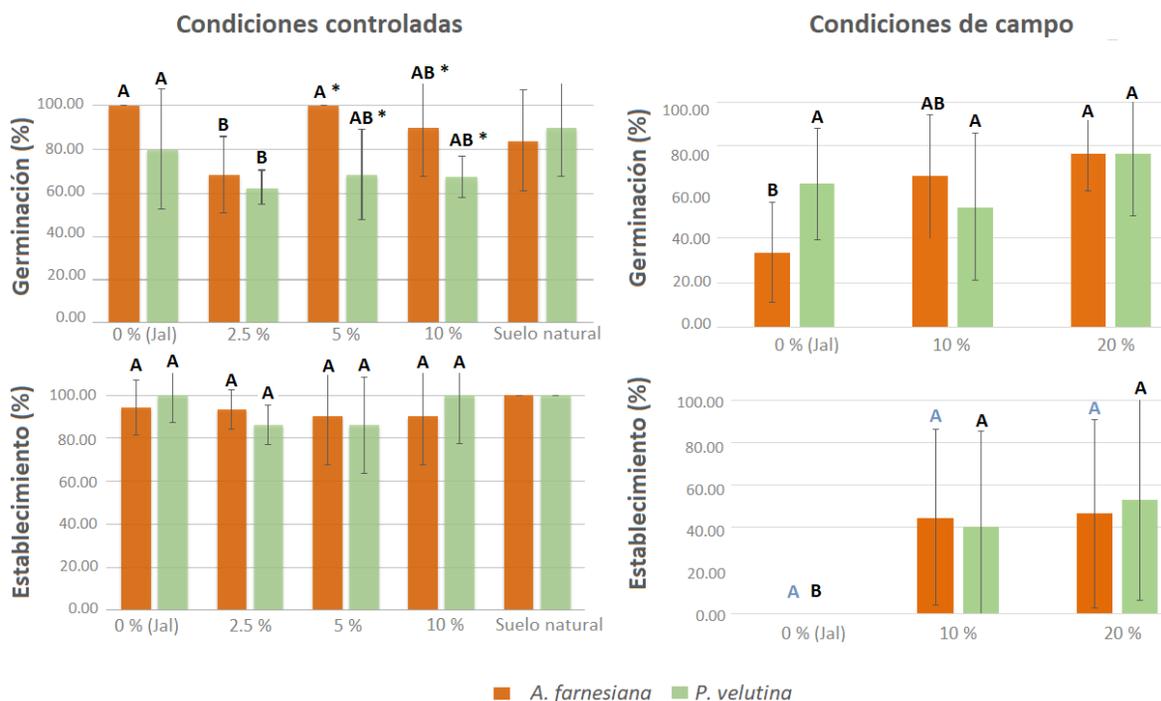


Figura 9. Germinación y establecimiento de *A. farnesiana* y *P. velutina* en condiciones controladas y de campo. El análisis estadístico se realizó sólo entre los tratamientos de mezclas jal-composta. Letras diferentes representan diferencias significativas en la germinación y establecimiento de cada especie entre los diferentes tratamientos, mientras que los asteriscos representan diferencias significativas entre las especies para un mismo tratamiento a una $p < 0.05$. Cuando no se indican asteriscos, se indica que no hubo diferencia significativa entre las especies. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos VII-VXII.

8.3. Respuesta de las plantas establecidas en los diferentes tratamientos de los experimentos.

8.3.1. Experimento bajo condiciones controladas

Las plantas establecidas a los 49 días bajo condiciones controladas, mostraron una clara diferencia en los parámetros de biomasa aérea (hojas y tallo), raíz, altura y la relación de biomasa raíz/biomasa aérea, entre las plantas establecidas en los diferentes tratamientos de mezclas de jal-composta.

El análisis estadístico de las mediciones realizadas en *A. farnesiana*, mostró diferencias significativas en todos los parámetros en plantas establecidas en los tratamientos de jal con composta y el tratamiento compuesto sólo por jal; estas diferencias llegaron a ser de 5 a 9 veces mayores en el peso de hojas, de 4 a 5 más en el peso del tallo y de 1 a 2 veces mayor en el peso de la raíz y la altura en los tratamientos con composta, que las establecidas en el puro jal. En el caso de la relación biomasa raíz/biomasa aérea fue inverso, siendo el doble en el tratamiento de puro jal que en el resto de los tratamientos. La adición de composta mostró una diferencia entre los tratamientos con composta y el tratamiento de puro jal; sin embargo, entre los tratamientos con composta (2.5, 5 y 10 %) no mostraron diferencias significativas entre estos (Figura 10).

Para *P. velutina* el análisis estadístico mostró una diferencia significativa en la mayoría de los parámetros medidos, en las plantas establecidas en los tratamientos de jal con mayor concentración de composta (5 y 10 %) y el tratamiento de puro jal. Entre las plantas establecidas en el tratamiento con 2.5 % de composta y el de puro jal, no hubo diferencia significativa entre los parámetros medidos. El peso de las hojas fue de 3 a 8 veces mayor en los tratamientos 5 y 10 %, que en el puro jal; el peso del tallo fue de 2 a 5 veces más, el peso de la raíz de 3 a 4 veces mayor y la altura fue hasta 2 veces más, respectivamente. En el caso de la relación de biomasa raíz/biomasa aérea no hubo una clara diferencia entre los tratamientos. El aumento de composta entre los tratamientos (2.5, 5, 10 %) marcó diferencia significativa en la respuesta de las plantas; las plantas establecidas en el 10 % tuvieron una mejor respuesta que el resto de las plantas establecidas en 2.5 y 5 %, en la mayoría de los parámetros medidos (Figura 10).

Por otro lado, se encontró que las especies estudiadas respondieron de manera distinta en los diferentes tratamientos con composta. En el tratamiento de 2.5 % de composta, *A.*

farnesiana mostró mejor desempeño que *P. velutina*, mientras que en los tratamientos de 5 y 10 %, *P. velutina* fue la que mostró el mejor desempeño (Figura 10).

8.3.2. Experimento bajo condiciones de campo

Al finalizar el experimento bajo condiciones de campo, sólo se pudieron comparar la respuesta de las plantas en los tratamientos de jal con composta (10 y 20 %), debido al nulo establecimiento de ambas especies en el tratamiento de puro jal. Además de medir los parámetros de biomasa aérea (hojas y tallo), raíz, altura y la relación de biomasa raíz/biomasa aérea, cómo en el experimento bajo condiciones controladas, en el experimento bajo condiciones de campo también se midió el parámetro de área foliar.

La respuesta de las plantas de *A. farnesiana* establecidas en los diferentes tratamientos con composta fue similar en la mayoría de los parámetros (peso de hojas y raíz, altura, relación de biomasa raíz/biomasa aérea y área foliar); sin embargo, en el peso del tallo el aumento en la concentración de composta mostró una mejoría en la acumulación de biomasa. El peso del tallo en el tratamiento de 20 % fue el doble que en el tratamiento de 10 % composta (Figura 11).

La respuesta de las plantas de *P. velutina* en la mayoría de los parámetros mostró una diferencia significativa entre tratamientos, excepto para el peso de la raíz y la relación biomasa raíz/biomasa aérea. El aumento en la concentración de la composta mostró una mejoría en la respuesta de las plantas, obteniendo prácticamente el doble del desempeño en el peso de las hojas, del tallo, la altura y el área foliar en las plantas establecidas en el tratamiento de 20 % con respecto a las establecidas en el 10 % de composta (Figura 11).

Las plantas de *A. farnesiana* y *P. velutina* establecidas en el tratamiento de 10 % se comportaron de una manera similar en todos los parámetros medidos. En contraste, en el tratamiento de 20 %, el comportamiento de las especies fue distinto en la mayoría de los parámetros medidos, siendo *P. velutina* la del mejor desempeño (Figura 11).

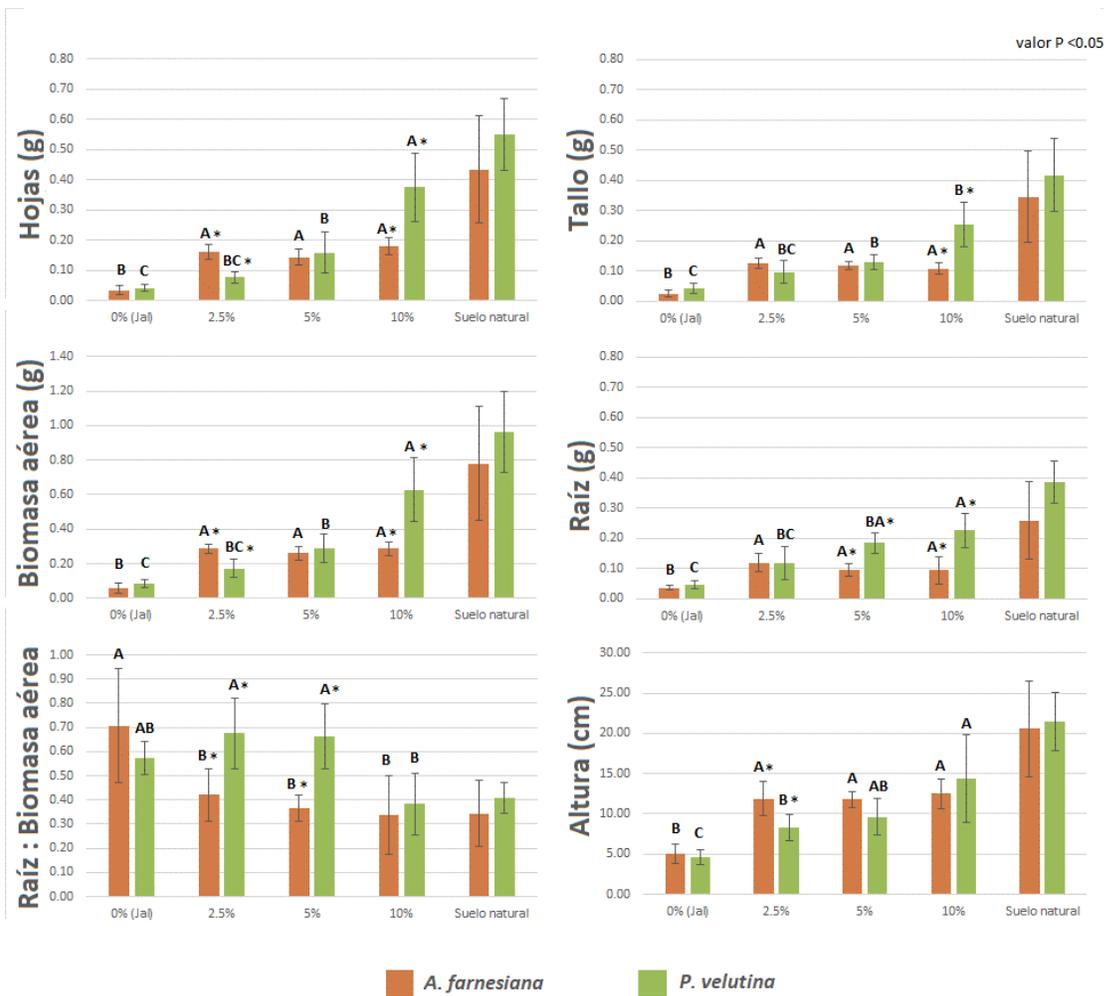


Figura 10. Respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* establecidas en los diferentes tratamientos al finalizar el experimento bajo condiciones controladas. El análisis estadístico se realizó sólo entre los tratamientos de mezclas jal-composta. Letras diferentes representan diferencias significativas de los parámetros medidos de cada especie entre los diferentes tratamientos, mientras que los asteriscos representan diferencias significativas en los parámetros medidos de las diferentes especies en un mismo tratamiento a una $p < 0.05$. Cuando no se indican asteriscos, se indica que no hubo diferencia significativa entre las especies. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos VII-XII.

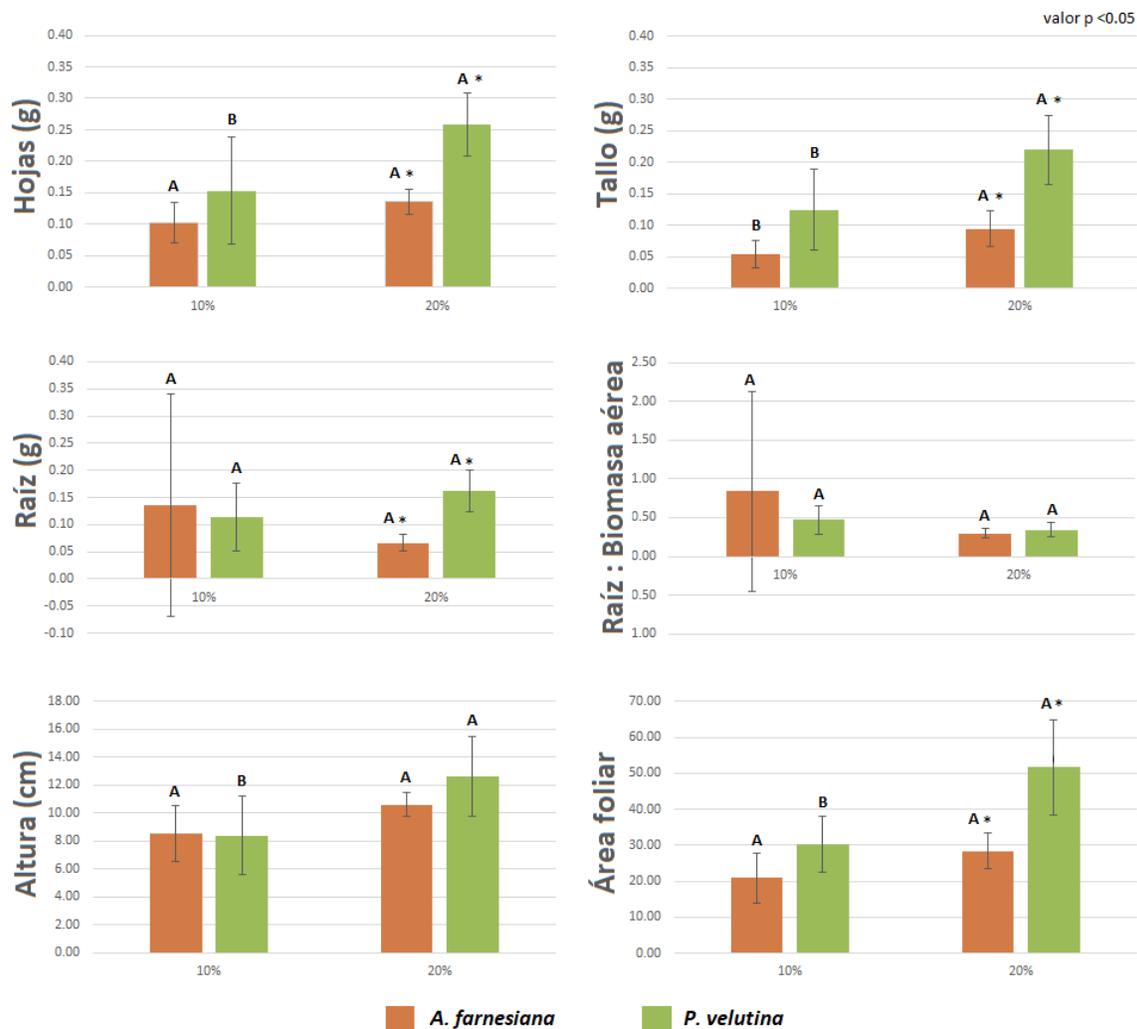


Figura 11. Respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* establecidas en los diferentes tratamientos (10 y 20 % composta) al finalizar el experimento bajo condiciones de campo. Letras diferentes representan diferencias significativas de los parámetros medidos de cada especie entre los diferentes tratamientos, mientras que los asteriscos representan diferencias significativas en los parámetros medidos de las diferentes especies en un mismo tratamiento a una $p < 0.05$. Cuando no se indican asteriscos, se indica que no hubo diferencia significativa entre las especies. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos XIII -XVII.

8.4. Efecto de la adición de composta en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los jales.

8.4.1. pH

La incorporación de composta en el jal tuvo un efecto muy claro en el pH de los tratamientos experimentales (10 y 20 %). Al inicio, la adición de composta al jal aumento el pH significativamente, de pH 5 en el tratamiento de 0 %, a valores de 8 en los tratamientos de 10 y 20 % de composta. Al final del experimento, a los 42 días, los valores fueron similares a los del inicio, sin mostrar diferencia significativa, con excepción del tratamiento de 20 %, donde aumentó 0.7 unidades. A pesar de ello, el aumento en la concentración de la composta entre los tratamientos de 10 y 20%, no mostró una diferencia significativa en los valores de pH durante el periodo del experimento de campo (Figura 12).

En relación con el efecto de las plantas crecidas en condiciones de campo en el pH del jal en el área de la rizósfera, se encontró que *A. farnesiana* tiende a disminuir el pH. El pH en el tratamiento de 10 % sin sembrar fue de 8.27, mientras que en la rizósfera de *A. farnesiana* en el mismo tratamiento fue de 7.8. Respecto a los valores de pH en el tratamiento de 20 % no mostraron diferencia significativa. A su vez, en la rizósfera de *P. velutina* los valores de pH no fueron diferentes con respecto a los tratamientos sin sembrar (Figura 13).

8.4.2. Conductividad eléctrica (CE)

El análisis del efecto de la composta en la CE del jal al inicio y final del experimento bajo condiciones de campo, mostró una clara diferencia de la CE del tratamiento compuesto por puro jal (0 %) y los tratamientos de jal con composta (10 y 20 %). Al inicio del experimento la adición de composta al jal aumentó de 3 a 5 veces más la CE, para el tratamiento de 0 % fue de 93 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que para 10 y 20 % fue de 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 528 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Entre estos dos últimos tratamientos no hubo diferencia significativa en la CE, sin embargo, estos resultaron ser estadísticamente diferentes del tratamiento de 0 %. Por otro lado, posterior a los 42 días, al final del experimento los valores de CE de cada tratamiento disminuyeron significativamente, en el tratamiento de 0 % la CE fue de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el de 10 % fue de 166 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en 20 % 276 $\mu\text{S}/\text{cm}$; no obstante, los tratamientos 10 y 20 % de composta permanecieron por arriba del tratamiento de 0 %, de 2 a 4 veces más alta. A diferencia del inicio del experimento, al final la CE de los

tratamientos 0, 10 y 20 % fue estadísticamente diferente entre sí, lo que sugiere que el aumento en la concentración de composta entre los diferentes tratamientos provocó un incremento en la CE (Figura 12).

En relación al efecto de las plantas en la CE del jal en el área de la rizósfera, no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos con planta y sin sembrar; sin embargo, en el tratamiento de 10 % se encontró que la CE en la rizósfera de *A. farnesiana* fue significativamente menor que en la rizósfera de *P. velutina*, 131 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 188 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente (Figura 13).

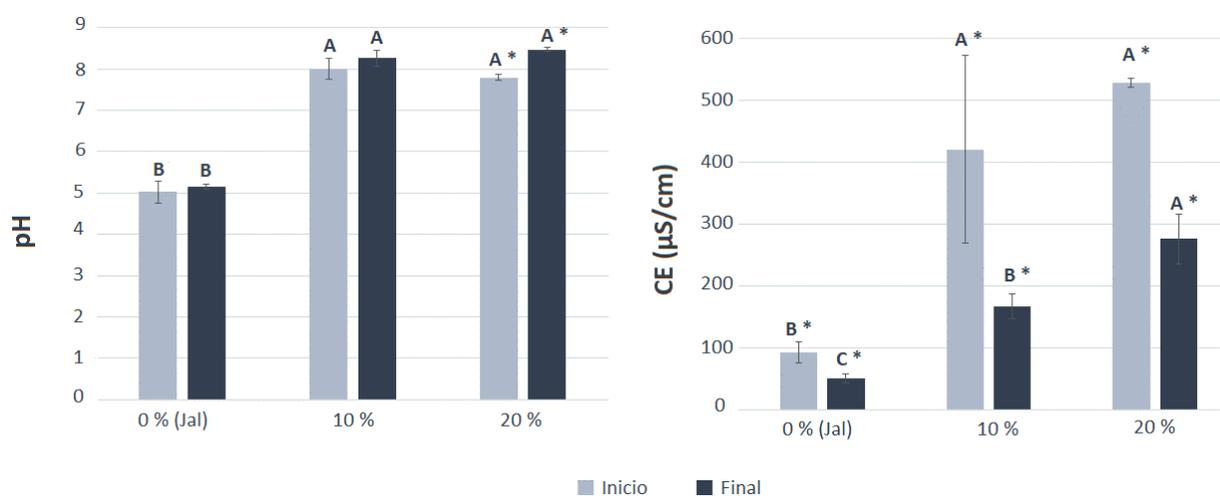


Figura 12. Valores de pH y CE en los tratamientos de mezclas de jal-composta (sin sembrar) al inicio y final del experimento bajo condiciones de campo. Letras diferentes representan diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, mientras que los asteriscos representan diferencias significativas entre el pH y CE del inicio y final del experimento en cada tratamiento a una $p < 0.05$. Cuando no se indican asteriscos, se indica que no hubo diferencia significativa entre las fases de inicio y final. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos XVIII-XIX y XXI-XXII.

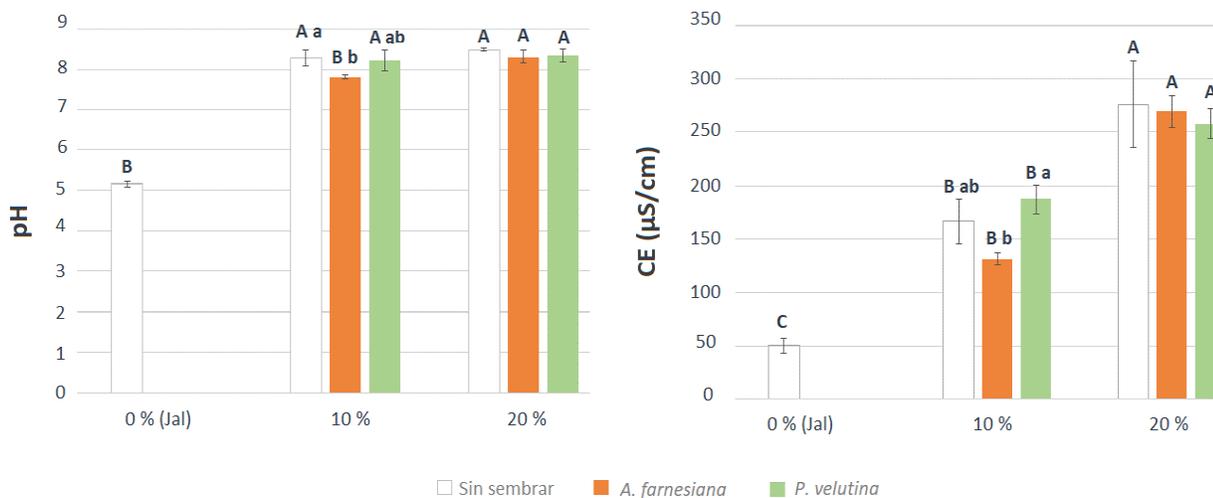


Figura 13. Valores de pH y CE en los tratamientos de mezclas de jal-composta sin sembrar y de la rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina* establecidas en 10 y 20 % de composta, al finalizar el experimento bajo condiciones de campo. Letras mayúsculas diferentes representan diferencias significativas en el pH y CE de los diferentes tratamientos sin sembrar y de la rizósfera de cada especie entre los diferentes tratamientos. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre las especies y el tratamiento sin sembrar para cada tratamiento de jal-composta a una $p < 0.05$. Cuando no se indican las letras minúsculas, se indica que no hubo diferencia significativa entre la rizósfera de las especies y el tratamiento sin sembrar en un mismo tratamiento de jal-composta. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexos XX y XXIII.

8.4.3. Actividad microbiana en el sustrato

Se infirió la actividad microbiana a partir de la mineralización del carbono en los tratamientos de 0 y 20 % de composta, en la rizósfera de las plantas y en los tratamientos sin sembrar, al comienzo y final del experimento bajo condiciones de campo.

El análisis del efecto de la composta en la actividad microbiana dio como resultado que la mineralización del carbono en los tratamientos sin sembrar varió significativamente, llegando a ser 17 veces mayor en el tratamiento de 20 % de composta que en el de 0 %. Posterior a los 42 días, la mineralización del carbono en el tratamiento de 20 % disminuyó, sin embargo, siguió siendo 6 veces mayor que en el tratamiento de 0 % composta; en relación al tratamiento de 0 %, no hubo diferencia significativa en la mineralización posterior a este período (Figura 14).

En relación al efecto de las plantas en la actividad microbiana, la evaluación de la mineralización del carbono en la rizósfera de ambas especies crecidas en el tratamiento de 20

% de composta, no varió significativamente con respecto al tratamiento 20 % sin sembrar. Es decir, al menos en el tiempo en que duró la incubación de las muestras, la presencia de las plantas no mostró un efecto significativo en la mineralización del carbono en la mezcla de jal y composta al 20 % (Figura 15).

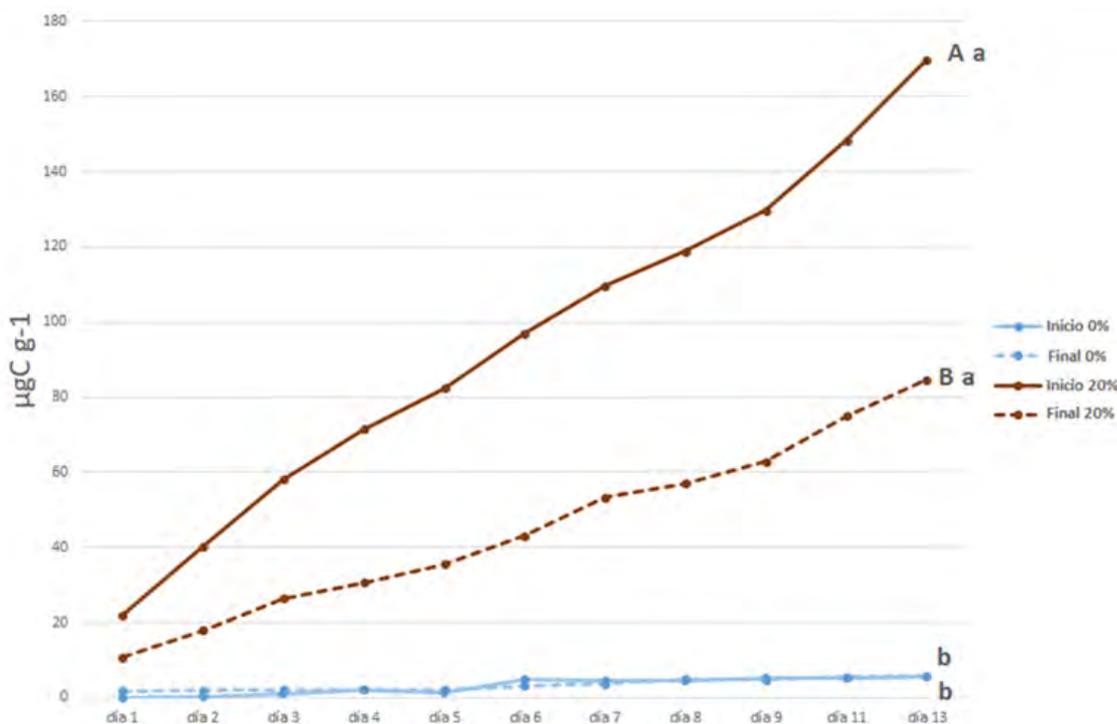


Figura 14. Mineralización del carbono en los tratamientos de mezclas de jal-composta sin sembrar en muestras del inicio y final del experimento en campo. Letras mayúsculas diferentes representan diferencias significativas de la mineralización del carbono acumulada, en muestras del inicio y del final del experimento de campo para cada tratamiento. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre los tratamientos con y sin composta en muestras del inicio y del final a una $p < 0.05$. Para más detalle ver Anexo XXIV.

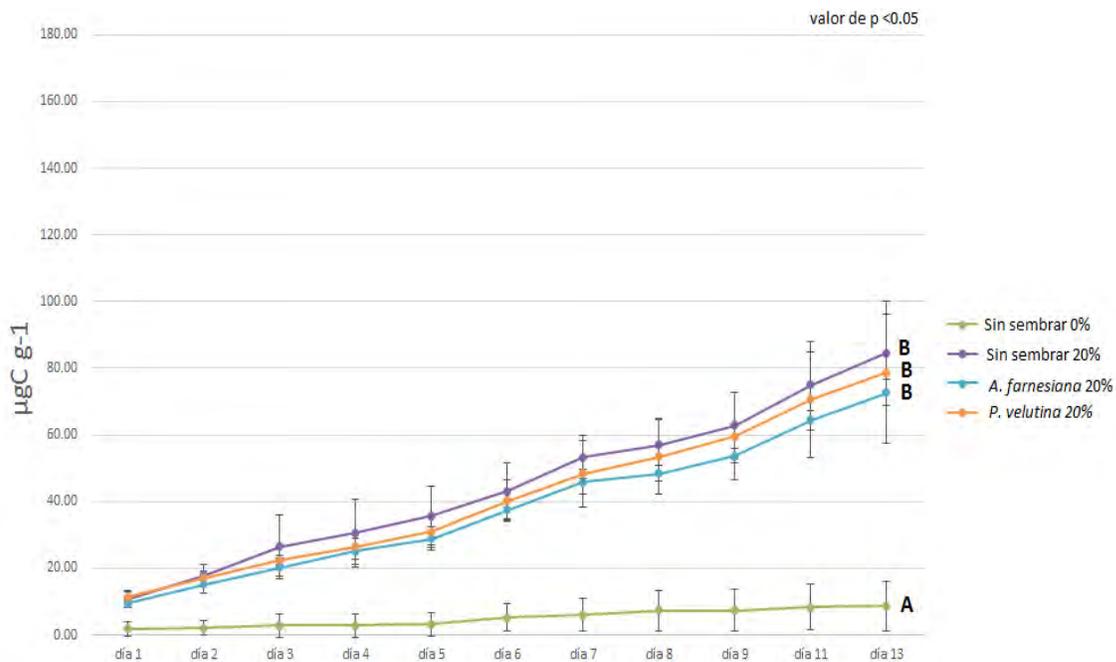


Figura 15. Mineralización del carbono en la rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina* crecidas en 20 % de composta y en los tratamientos sin sembrar 0 y 20 % composta. Letras diferentes representan diferencias significativas en la mineralización del carbono acumulada, entre las diferentes muestras a una $p < 0.05$. Las barras representan la desviación estándar. Para más detalle ver Anexo XXV.

8.5. Metales en sustrato y en tejido vegetal

8.5.1. Experimento bajo condiciones controladas

En el análisis de metales en rizósfera y tejido vegetal del experimento bajo condiciones controladas, por medio de la técnica ICP-OES, fue necesario analizar estándares certificados como verificación de un procedimiento de calidad en el análisis de las muestras. El análisis de metales del estándar de sedimentos inorgánicos marinos (NIST 2702), que representaba las muestras de sustrato, mostró valores de recuperación adecuados solo para los metales Co, Cu y Zn. Mientras que el análisis del estándar de hojas de manzano (NIST 1515), que representaba las muestras de tejido vegetal, mostró valores de recuperación adecuados para Ni y Zn. El resto de los 20 metales analizados en los estándares no mostraron un valor de recuperación adecuado

(85-115 %); ver más detalle en Anexo XXVI. A pesar de lo anterior, fue posible observar diferencias significativas y tendencias entre las concentraciones de ciertos metales en muestras de rizósfera y tejido vegetal de los diferentes tratamientos.

8.5.1.1. Metales en la rizósfera

En muestras de la rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos de mezclas de jal-composta, los 10 metales con mayor concentración fueron Fe, Al, Cu, Zn, Mn, Ba, Mo, Pb, Sr y As con concentraciones que fluctúan entre 13 y 7 000 mg/Kg.

De los 20 metales analizados, 12 (Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, Tl, V y Zn) mostraron diferencias significativas en su concentración, en la rizósfera de *A. farnesiana* entre los diferentes tratamientos. Las concentraciones de Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Sr y Zn fueron significativamente diferentes en los tratamientos con composta (2.5, 5 y 10 %) con respecto al tratamiento de 0 % composta. Para estos casos, el aumento en la concentración de composta estuvo asociado a un aumento en la concentración de metales en la rizósfera, a excepción de Ag, Cd y Cu, que no mostraron una clara diferencia en la concentración en los tratamientos 2.5, 5 y 10 % de composta. La concentración de los metales Pb, Ni, V y Tl en el tratamiento 0 y 2.5 % composta fueron similares, inclusive, las concentraciones en 0 y 5 % composta de Tl y Zn también fueron parecidas. En el caso del Pb y Ni en los tratamientos 5 y 10 % mostraron que, a mayor concentración de composta, mayor concentración de metal. Mientras que para Tl se encontró que, a mayor concentración de composta, menor concentración de metal (Anexo XXVII).

En el análisis estadístico de las concentraciones de metales en las muestras de rizósfera de *P. velutina*, 12 metales mostraron diferencias significativas entre algunos de los tratamientos (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Sr, Tl, V y Zn). De estos anteriores, sólo las concentraciones de Pb y Sr fueron diferentes en el tratamiento de 0 % composta y los tratamientos con composta (2.5, 5 y 10 %); la adición de composta reflejó un aumento en la concentración de estos metales. Para los metales Ag, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Tl, V y Zn, las concentraciones entre los tratamientos 0 y 2.5 % fueron similares, inclusive para V y Zn las concentraciones en 0 y 5 % no variaron significativamente. En relación con las concentraciones de los metales Ag, Cu, Pb, Mo, V y Zn no mostraron diferencia significativa respecto al aumento de composta entre los tratamientos 2.5, 5 y 10 %. La concentración de Tl, al igual que en la rizósfera de *A. farnesiana*, disminuyó respecto al aumento en la concentración de composta (Anexo XVIII).

El análisis estadístico entre las concentraciones de los metales en la rizósfera de ambas especies mostró diferencias significativas en la concentración de Mo en el tratamiento 0 %, y Ba y Cu en el tratamiento de 2.5 %; siendo mayor en la rizósfera de *A. farnesiana* que en la de *P. velutina*, para los tres casos (Anexo XXIX).

8.5.1.2. Metales en el tejido vegetal

En las muestras de tejido vegetal de ambas especies crecidas en los diferentes tratamientos de mezclas de jal-composta, al igual que en la rizósfera, los metales con mayor concentración fueron Fe, Al, Cu, Zn, Mn, Se, Sr, Mo, además de Cr, Se y Tl; con concentraciones entre 7 y 740 mg/Kg.

De los 20 metales analizados, en el tejido de *A. farnesiana* sólo las concentraciones de Mn mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, encontrándose que el aumento de composta entre los tratamientos (2.5, 5 y 10 %) disminuyó la concentración del metal. En el análisis estadístico no se pudo incluir el tratamiento de 0 %, debido a que una de las tres réplicas estaba por debajo del nivel detectable del equipo de lectura. El resto de los metales analizados no mostraron diferencias significativas en la concentración entre los distintos los tratamientos (Anexo XXX).

En las muestras de tejido de *P. velutina*, se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Se, Ag, Tl y Zn en los diferentes tratamientos. La concentración de la mayoría de los metales anteriores fue similar entre los tratamientos de 0 y 2.5 % de composta (Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Se, Ag, Tl), e inclusive a la concentración en el tratamiento de 5 % para algunos metales (Al, Ni, Se y Tl). Para el caso de Mn y Zn las concentraciones en los tratamientos de 5 y 10 % fueron similares al 0 % de composta. No obstante, de manera general para los metales cuyas concentraciones tuvieron una diferencia significativa entre los tratamientos, el aumento de composta estuvo asociado a una disminución en la concentración de dichos metales, a excepción del Mn, Sr y Zn (Anexo XXXI).

El análisis estadístico entre las concentraciones de los metales en el tejido vegetal de ambas especies mostró diferencias significativas en la concentración de Al, Cr, Cu, Mn, Mo, Se, Ag, Zn en el tratamiento 2.5 %; Cu, Fe en el 5 %; y Cu, Mn y Sr en el 10 %; siendo para todos los casos las concentraciones en *A. farnesiana* menores que en *P. velutina* (Anexo XXXII).

8.5.1.3. Máximos niveles tolerables de metales

Las concentraciones de metales en el tejido de ambas especies fueron comparadas con los Máximos Niveles Tolerables (MNT) de metales en alimento animal (National Research Council, 2005). La concentración de Cu y Se en *A. farnesiana* crecida en el tratamiento 0 % rebasaba los MNT para ganado y ovejas; además, en el caso del Se estaba por arriba del MNT para roedores. Sin embargo, para *P. velutina* se encontraron concentraciones de Al, Cu, Fe, Mo y Se en al menos alguno de los distintos tratamientos mayores a los MNT para roedores, ganado y ovejas. Esto ocurrió más frecuentemente con el tratamiento de 0 %; ver detalle en Tabla 5 y Anexos XXXIII y XXXIV. El aumento de composta en los diferentes tratamientos disminuyó la concentración de Al, Cu, Fe y Se por debajo de los MNT; sin embargo, en Mo el aumento de composta aumentó la concentración por arriba del MNT.

Tabla 5. Comparación de la concentración de metales en tejido vegetal y los Máximos Niveles Tolerables (MNT) de metales en alimento animal (National Research Council, 2005).

Especie	Metal	Tratamientos				Roedores	MNT	
		0 %	2.5 %	5 %	10 %		Ganado	Ovejas
<i>A. farnesiana</i>	Cu	21.9 ± 17.38	8.26 ± 0.83	6.67 ± 1.64	5.51 ± 1.23	500	40	15
	Se	5.3 ± 4.69	1.84 ± 0.38	2.26 ± 0.52	2.26 ± 0.52	5	5	5
<i>P. velutina</i>	Al	23.19 ± 81.47	221.72 ± 11.01	126.32 ± 16.2	91.47 ± 32.68	200	1000	1000
	Cu	50.8 ± 16.1	29.84 ± 2.66	11.69 ± 1.52	17.49 ± 6.93	500	40	15
	Mo	1.8 ± 1.0	3.08 ± 0.94	6.84 ± 3.18	7.35 ± 3.64	7	5	5
	Se	5.3 ± 3.0	3.51 ± 0.53	2.16 ± 0.37	1.28 ± 0.5	5	5	5

Concentración de metales en el tejido vegetal de *A. farnesiana* y *P. velutina* crecidas en los diferentes tratamientos en condiciones controladas, comparadas con los Máximos Niveles Tolerables (MNT). Las concentraciones de los metales en tejido vegetal y los máximos niveles tolerables se encuentran en mg/Kg.

8.5.1.4. Factor de acumulación

En la determinación del factor de acumulación de metales, se encontró que *A. farnesiana* es acumuladora en sus tejidos aéreos de Cr en los tratamientos de 0 y 5 %; Ni en 0 y 2.5 %; Sr en 2.5 %; y Tl en 0, 2.5, 5 y 10 %. Por su parte, *P. velutina* mostró ser acumuladora de Cr en los tratamientos de 0, 2.5 y 5 %; Mn en 2.5 %; Ni en 0, 2.5, 5 %; Sr en 10 %; Tl en 0, 2.5, 5 y 10 %; y Zn en 2.5 %. Los metales con mayor acumulación fueron Cr y Tl en ambas especies; ver detalles en la Figura 16. Además, se observó una tendencia (no estadística) en el factor de acumulación

con respecto al aumento de la concentración de composta en el sustrato. Para *A. farnesiana* las concentraciones de Cr, Ni y Sr disminuyeron notablemente cuando aumenta la concentración de la composta; así mismo, para *P. velutina* lo anterior es notorio en las concentraciones de metales de Cr y Ni (Figura 16).

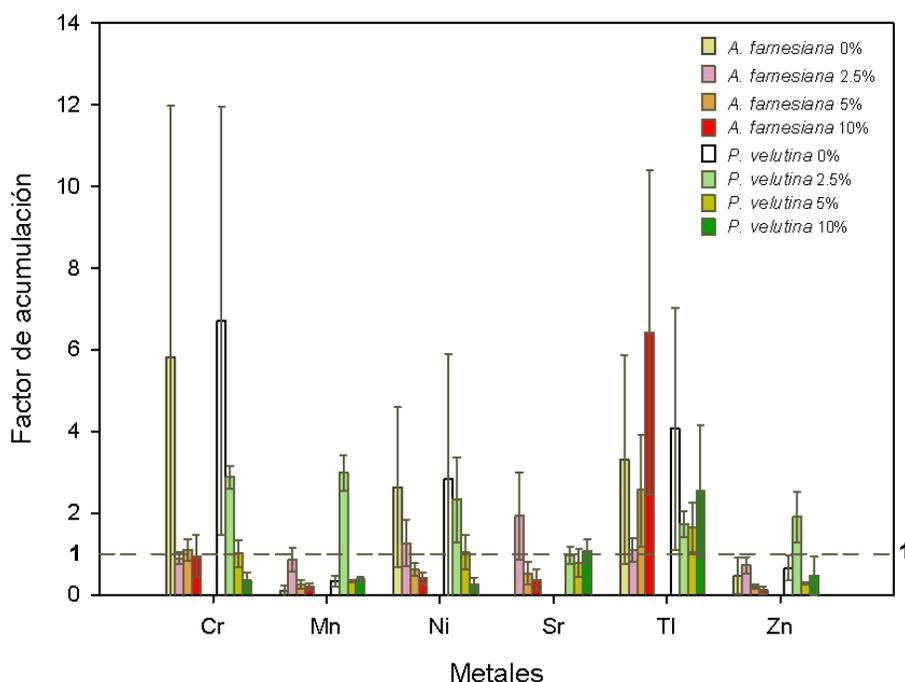


Figura 16. Factor de acumulación de metales en tejido aéreo de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas. Para más detalle ver Anexos XXXV y XXXVI.

8.5.2. Experimento bajo condiciones de campo

Debido al nulo establecimiento de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento de 0 % de composta bajo condiciones de campo, el análisis de metales solo se realizó en muestras de tejido vegetal y de rizósfera de individuos establecidos en los tratamientos de 10 y 20 % composta; además del análisis de las muestras de sustrato de los tratamientos sin sembrar. Respecto a las muestras de tejido vegetal, sólo el 50 % de los individuos acumuló biomasa aérea suficiente para el análisis por medio de la técnica de ICP-MS, realizada en el laboratorio ALS Minerals. Sin embargo, se observaron tendencias entre las concentraciones de ciertos metales, en muestras de tejido vegetal de individuos de *A. farnesiana* establecidos en 10 % de composta y *P. velutina*

en 10 y 20 %. En relación a las muestras de rizósfera y sustrato sin sembrar semillas, estas fueron suficientes para el análisis de metales; y los resultados mostraron diferencias estadísticas y tendencias entre las concentraciones de metales de los diferentes tratamientos.

8.5.2.1. Metales en la rizósfera

En las muestras de rizósfera y de sustrato sin sembrar, se analizaron un total de 63 metales; de los cuales K, Al, Fe, Mg, Na, Ca, Ti, P, Cu y Ba fueron los 10 metales con mayor concentración, con valores entre 8 y 1 200 mg/Kg.

En la rizósfera de *A. farnesiana* en los distintos tratamientos (10 y 20 %), 6 (Ca, Cu, Mo, Na, P y Sr) de los 63 metales analizados, mostraron diferencias significativas en la concentración. En estos casos se observó que el aumento en la concentración de composta entre los tratamientos, estuvo relacionado con un aumento en la concentración de dichos metales. El resto de los metales no mostró diferencias significativas en los distintos tratamientos (Anexo XXXVII).

En el caso de *P. velutina* se encontraron diferencias significativas en la concentración de 27 metales (Ag, B, Cd, Co, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, In, K, La, Mn, Mo, Na, Nd, Sm, Sr, Tb, Th, U, V, W, Y, Yb, y Zn) entre los distintos tratamientos. De igual manera, el aumento en la concentración de composta estuvo relacionado con un aumento en la concentración de la mayoría de estos metales; a excepción de B y Zr, donde el aumento de composta disminuyó la concentración del metal en la rizósfera (Anexo XXXVIII).

En las muestras de sustrato de los tratamientos 0, 10 y 20 % de composta sin sembrar, 23 metales (Ag, As, Ca, Co, Cr, Cu, Er, Eu, Fe, Gd, Li, Na, Nd, P, Pb, Pr, Sm, Sr, Tb, Te, W, Y y Zn) mostraron diferencias significativas en su concentración en los diferentes tratamientos. Las concentraciones de As, Ca, Li, P, Pb y Sr fueron significativamente diferentes en los tratamientos con composta (10 y 20 %) con respecto tratamiento de 0 % de composta; siendo mayores las concentraciones en los tratamientos con composta, que en el de 0 %. Mientras tanto, para los metales Ag, Co, Cu, Eu, Er, Fe, Gd, Na, Nd, Pr, Sm, Tb, Te, W, V y Zn, las concentraciones entre los tratamientos de 0 y 10 % de composta fueron similares. El aumento en la concentración de composta entre los tratamientos 10 y 20 % mostró un aumento en la concentración de Ag, Ca, Co, Cr, Cu, Eu, Na, Nd, P, Sr y Tb. Las concentraciones de los metales Er, Fe, Gd, Pr, Te, W, Y y Zn no mostraron una clara diferencia entre los distintos tratamientos (Anexo XXXIX).

El análisis estadístico entre las concentraciones de los metales en la rizósfera de ambas especies y los tratamientos sin sembrar, explicó la influencia de las plantas en la concentración de metales en el área de la rizósfera en los diferentes tratamientos. En el tratamiento de 20 % composta, ambas especies tuvieron menores concentraciones de Ce y Zr respecto al tratamiento sin sembrar. Por su parte *A. farnesiana* tuvo menor concentración de Na y Sr en el tratamiento de 10 % que *P. velutina* y el tratamiento sin sembrar. Así mismo, *P. velutina* en el tratamiento de 20 % mostró menor concentración de Te y Tm, y mayor concentración de B y Li en el tratamiento de 10 %, que *A. farnesiana* y el tratamiento sin sembrar. En el resto de los metales analizados no hubo diferencia significativa respecto a los tratamientos con planta y sin sembrar (Anexo XXXX).

8.5.2.2. Metales en el tejido vegetal y Máximos niveles tolerables de metales

En las muestras de tejido vegetal de ambas especies crecidas en los diferentes tratamientos, se analizaron un total de 53 metales; y al igual que en la rizósfera, entre los 10 metales con mayor concentración se encontró K, Ca, P, Na, Fe y Al, además de S, Mn, Sr y B; con concentraciones entre 50 y 13 750 mg/Kg.

Las concentraciones de los metales en el tejido vegetal de *A. farnesiana* en el tratamiento de 10 % de composta, no rebasó los MNT de metales en alimento para roedores, ganado y ovejas. Sin embargo, en el tejido de *P. velutina* en 10 %, se encontró que la concentración de Cu rebasó el MNT para ovejas, y la de Mo para ganado y ovejas. De igual manera *P. velutina* en 20 % de composta rebasó el MNT de Cu para ovejas, además de K para roedores y S para ganado y ovejas. El aumento de composta del tratamiento 10 al 20 %, aumentó la concentración de K y S de los tejidos de *P. velutina* por arriba de los MNT; ver detalle en Tabla 6 y Anexo XXXXI.

Además del análisis de metales en tejido vegetal de las especies crecidas en el experimento en condiciones de campo, se analizó el tejido vegetal de individuos adultos de estas mismas especies, pero crecidas en los parches de vegetación del sitio de estudio. Entre los metales con mayor concentración en su tejido vegetal se encontró el Ca, K, S, P y Fe, con concentraciones de 13 730 y 350 mg/Kg. Los individuos adultos de *A. farnesiana* y *P. velutina* mostraron concentraciones de Cu mayor a los MNT para ganado y ovejas; y concentraciones de S por arriba de los MNT para ganado y ovejas, además de roedores en el caso de *P. velutina*.

8.5.2.3. Factor de acumulación

En la determinación del factor de acumulación de metales en condiciones de campo, se encontró que *A. farnesiana* en el tratamiento de 10 % de composta es acumuladora en sus tejidos aéreos de B, Ca, Cd, Co, Cr, K, Mg, Mn, Sr, Te y Zn. Por su parte, *P. velutina* mostró ser acumuladora de Ag, B, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Sr y Zn en el tratamiento de 10 %; y en el tratamiento de 20 % también mostró ser acumuladora de los metales mencionados anteriormente (a excepción del La) y de Au, Rb y Se; ver detalles en la Figura 17. Además, se observó una tendencia (no estadística) en el factor de acumulación con respecto al aumento de la concentración de composta en el sustrato. Para *P. velutina* las concentraciones de Ag, Ca, Cd, Co, Cu, Mg, Mn, Ni, P, Sr y Zn disminuyen notablemente con respecto al aumento de la concentración de composta (Figura 17).

Tabla 6. Comparación de la concentración de metales en tejido vegetal y los Máximos Niveles Tolerables (MNT) de metales en alimento animal (National Research Council, 2005).

Especie	Metal	Tratamientos		MNT		
		10 %	20 %	Roedores	Ganado	Ovejas
<i>P. velutina</i>	Cu	27.3 ± 6.5	33.8 ± 5.9	500	40	15
	K	8900.0 ± 1131.4	13750.0 ± 1767.8	10000	20000	20000
	Mo	5.4 ± 0.6	5.0 ± 3.1	7	5	5
	S	2000.0 ± 0.0	3050.0 ± 212.1	5000	3000	3000
Parches de vegetación						
<i>A. farnesiana</i>	Cu	52.37 ± 9.15		500	40	15
	S	3033.33 ± 288.67		5000	3000	3000
<i>P. velutina</i>	Cu	72.67 ± 37.12		500	40	15
	S	5966.67 ± 1289.70		5000	3000	3000

Concentración de metales en *P. velutina* crecida en los diferentes tratamientos en condiciones de campo, e individuos adultos de *A. farnesiana* y *P. velutina* crecidos en los parches de vegetación del sitio de estudio. Las concentraciones de los metales en tejido vegetal y los máximos niveles tolerables se encuentran en mg/Kg.

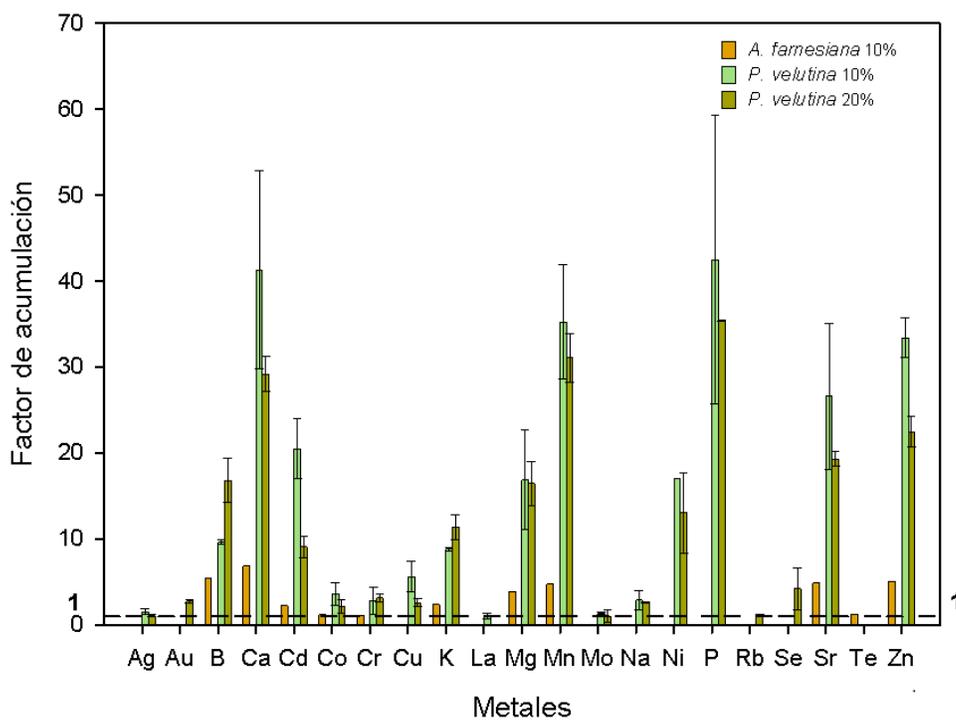


Figura 17. Factor de acumulación de metales en tejido aéreo de *A. farnesiana* y *P. velutina* en los diferentes tratamientos bajo condiciones de campo. Para más detalle ver Anexo XXXXII.

IX. DISCUSIÓN

9.1. Limitantes ecológicas de la vegetación y las especies de estudio en los jales de Nacozari

Los jales son sitios adversos para el establecimiento de plantas (Mendez & Maier, 2008; Lottermoser, 2010). Las principales condiciones a las que se le atribuye este efecto son generalmente la alta concentración de metales, poca estructura del sustrato, poca retención de humedad, pH ácido, y bajo contenido de MOS y nutrientes (Lottermoser, 2010). En el presente estudio no encontramos concentraciones de metales solubles tóxicas para las plantas, los resultados se muestran por debajo de los niveles tóxicos en el sustrato para plantas reportados por Mendez y Meier (2008). Sin embargo, otro estudio realizado con anterioridad en este mismo depósito de jales de Nacozari, reporta concentraciones totales tóxicas de Cu (Meza-Figueroa et al., 2009); así mismo, debido a que las concentraciones de ciertos metales aumentan en las sales eflorescentes (Meza-Figueroa et al., 2009), se detectó que metales como Cu, Mn, Ni y Zn se encuentran presentes en concentraciones que pueden afectar el establecimiento y desarrollo de las plantas. Por otro lado, el valor de pH en nuestro sitio de estudio fue ácido 5.02 ± 0.27 en comparación con los valores de pH de suelos de zonas áridas que generalmente se mantienen por arriba de 7 (Brady & Weil, 2017). Los valores óptimos para el desarrollo de las raíces de las plantas se encuentra entre un pH de 5 y 7.5, siendo valores por debajo de pH 5 una condición estresantes para el desarrollo de las plantas (Marschner, 2012). Así mismo, los valores de los nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas carbono (0.22-0.09 %) y nitrógeno (0.034- <0.017 %) encontrados en el depósito de jales sugieren que este sustrato se encuentra en las categorías de fertilidad de “muy pobre” a “extremadamente pobre”, según la legislación mexicana que establece las especificaciones de fertilidad de suelos (NOM-021-RECNAT-2000). Sin embargo, a pesar de estas condiciones adversas, hay plantas que se establecen en los jales que se están regenerando activamente y estas pueden ser aprovechadas con fines de fitorremediación (Shu et al., 2005; Parraga-Aguado et al., 2013; Ginocchio et al., 2017; Santos et al., 2017).

La vegetación que ha colonizado naturalmente los jales de Nacozari solo se desarrolla en parches de poca extensión (0.84 % del área) compuesta por especies anuales y perennes (Santos et al., 2017). Un estudio previo ha reportado condiciones similares de pH, conductividad eléctrica, textura, y concentraciones de metales entre los parches de vegetación y fuera de ellos

(Santos et al., 2017). Sin embargo, en nuestro estudio se encontraron mayores niveles de nutrientes y MOS (10 veces más en N, 15 más veces MOS) en el sustrato bajo arbustos en los parches de vegetación. Estas evidencias sugieren que, a pesar de las condiciones fisicoquímicas adversas de los jales de Nacozari, los niveles de nutrientes son un factor ecológico importante que determina el establecimiento de las plantas. Además, los tratamientos del experimento en condiciones controladas, los cuales fueron regados diariamente, tuvieron mayor porcentaje de germinación que el experimento en campo que fue regado semanalmente, así como un establecimiento de alrededor del 100 %. Esto sugiere que el agua en los jales es un factor co-limitante con los nutrientes a la germinación y establecimiento de las especies de estudio. Nuestros hallazgos coinciden con otros estudios en jales donde el establecimiento de plantas es limitado por factores diferentes a la concentración de metales (Parraga-Aguado et al., 2013; Santos et al., 2017).

Las plantas colonizadoras pioneras modifican las condiciones en los jales, añadiendo MOS y nutrientes, favoreciendo al establecimiento de especies secundarias (Shu et al., 2005). En los jales de Nacozari se han registrado 42 especies de plantas que han colonizado este sitio desde su establecimiento, hace aproximadamente 60 años (Santos et al., 2017). Sin embargo, se desconoce cuáles de estas especies funcionan como pioneras y cuáles como secundarias. En este trabajo, estudiando dos de las especies de plantas más abundantes de los jales de Nacozari, *A. farnesiana* y *P. velutina*, se encontró un nulo establecimiento en los tratamientos sin composta del experimento de campo. La adición de composta en 10-20 % logró que ambas especies tuvieran un establecimiento de 40-53 % en el período de tiempo evaluado (42 días). De acuerdo a estos hallazgos ambas especies se pueden considerar como secundarias las cuales se establecen solo en sitios enriquecidos en nutrientes y MOS. Con respecto al manejo de ambas especies para ser utilizadas en la fitoestabilización de jales mineros, nuestros resultados sugieren que se debe establecer primero una cobertura vegetal de especies pioneras o adicionar composta para incrementar la cobertura de ambas especies. Experimentos similares con otras especies permitirán un mejor manejo de las especies colonizadoras del jal para fitoestabilización (Gil-Loaiza et al., 2016).

9.2. Efecto de la composta y las especies de plantas en variables abióticas y bióticas de los jales

La adición de composta puede influenciar las condiciones de los jales. En este estudio se encontró que la adición de composta en los tratamientos de campo aumenta el pH y la CE del sustrato (Figuras 17-20). Esto concuerda con lo reportado por otros estudios que se han realizado en este tema (O'Dell et al., 2007; Solis-Dominguez et al., 2012; Valentín-Vargas et al., 2014; Gil-Loaiza et al., 2016). En nuestro estudio y en los otros, estos cambios en pH y CE ocurren desde el inicio de los experimentos, lo cual indica una fuerte influencia de las características previas de la composta sobre las condiciones del jal. Aunque la CE aumenta con adición de composta en nuestro estudio, los niveles alcanzados (130-530 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Figuras 19 y 20) están muy por debajo de niveles perjudiciales para plantas o procesos microbianos ($> 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$, Brady & Weil, 2017). Esto sugiere que la salinidad no es un factor limitante para las prácticas de fitoestabilización en los jales de Nacozari. La adición de composta causó que el jal pasara de ser fuertemente ácido (pH 5) a poco o moderadamente alcalino (pH entre 7.5-8.5, Soil Science Division Staff, 2017). El pH es una variable que afecta una gran cantidad de procesos, entre ellos la germinación de semillas, la composición de la comunidad microbiana, la toma de nutrientes por las raíces, la disponibilidad de iones y la disponibilidad y solubilidad de metales pesados (Valentín-Vargas et al., 2014; Brady y Weil, 2017).

En varios estudios previos, la adición de composta en jales (tanto en condiciones controladas como en campo) por lo general disminuyó la concentración y/o disponibilidad de metales en el sustrato (O'Dell et al., 2007; Jordan et al., 2008; Solis-Dominguez et al., 2012; Yang et al., 2013; Bolan et al., 2014), esto principalmente está asociado a la capacidad de algunos compuestos húmicos para ligarse a metales. Cabe mencionar que estos estudios han considerado entre 2 y 7 diferentes metales. En el presente estudio se incluyeron mediciones de concentraciones en el sustrato para 20 metales en los experimentos de condiciones controladas y 63 metales en condiciones de campo. La adición de composta aumentó la concentración en 11 metales en la rizósfera de los experimentos en condiciones controladas (Anexos XXVII y XXVIII) y en 22 metales en los tratamientos sin siembra del experimento en campo (Anexo XXXIX), incluso en Cd y Cu que ya estaban en niveles considerados tóxicos para las plantas (3 y 200 mg/Kg respectivamente; Mendez & Maier, 2008). La concentración en la rizósfera disminuyó solo en un metal tanto en condiciones controladas como en condiciones de campo. La concentración del resto de los metales en la rizósfera permaneció sin cambio. De acuerdo a Bolan y col. (2014),

condiciones alcalinas en presencia de carbón soluble pueden aumentar la movilidad de metales en suelos contaminados con metales suministrados con enmiendas orgánicas. Así, la alcalinización del pH causada por la adición de composta junto con compuestos solubles de carbono, pudieron causar el aumento en la concentración de metales en la rizósfera en el presente estudio.

En este estudio, los tratamientos de composta mostraron una actividad microbiana (mineralización del carbono) hasta 17 veces mayor que en el jal al inicio del experimento, y hasta seis veces mayor que el jal al final del experimento. Patrones similares se han reportado en otros estudios que reportan la mineralización del carbono en jales bajo tratamientos de enmiendas orgánicas (Zornoza et al., 2013). Tales aumentos en la actividad microbiana concuerdan con reportes del cambio en las comunidades microbianas al añadir composta en los jales. Se ha reportado un aumento en la biomasa y abundancia microbiana con la adición de composta en los jales, la cual es principalmente explicada por el incremento en las poblaciones de bacterias neutrofílicas, más que por aumento en las poblaciones de hongos o arqueas (Solis-Dominguez et al., 2012; Valentín-Vargas et al., 2014; Gil-Loaiza et al., 2016). El mayor aumento en bacterias neutrofílicas está influenciado inicialmente a la comunidad microbiana propia de la composta, pero posteriormente por parámetros como el pH (Valentín-Vargas et al., 2014). En nuestros experimentos esto se puede ver favorecido por el aumento del pH causado por la adición de composta. Varios estudios han demostrado que la mayor abundancia microbiana en jales adicionados con composta en comparación con jales no adicionados, se mantiene al menos hasta por 4 años (Gil-Loaiza et al., 2016). Se espera que el mantenimiento de la actividad microbiana en el tiempo sea uno de los factores que favorezcan el establecimiento exitoso y crecimiento de las especies, y la disponibilidad de nutrientes en la práctica de la fitoestabilización asistida (Wang et al., 2017), en especial para las especies no pioneras como *A. farnesiana* y *P. velutina*.

Hay evidencia experimental que indica que las plantas pueden influir en las características bióticas y abióticas del suelo (Schulze et al., 2005). La evidencia experimental sobre la importancia de las plantas como agentes modificadores de las condiciones de los jales mineros, tanto en condiciones controladas como en campo, es muy limitada. Solis-Dominguez et al (2012) encontraron una relación positiva entre la biomasa vegetal, el pH y la abundancia de la comunidad microbiana. En el presente estudio, al contrastar los tratamientos de composta con siembra de plantas contra los no sembrados, no se encontró evidencia de una influencia de

las plantas sobre la respiración microbiana (Figura 15). Sin embargo, se encontró en los tratamientos con 10 % de composta que *A. farnesiana* disminuyó su pH (7.8) por debajo del tratamiento sin siembra (8.3), y disminuyó la CE en 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por debajo del tratamiento sin siembra (Figura 13). Además, se detectó que la presencia de las plantas de ambas especies aumentó la concentración de varios metales en la rizósfera (B, Ca, Ce, K, Li, Na, Sr, Te, Tm y Zr; Anexo XXXX). El mecanismo por el cual las plantas pudieron regular estas variables en este estudio aún no está claro, pero pueden estar relacionados con: la exudación de ácidos orgánicos por las raíces, a la regulación de las cargas internas mediante la expulsión de H^+ o OH^- por las raíces al adquirir ciertos iones (metálicos u otros), al acarreo de iones y nutrientes con la toma de agua de la planta y a la absorción selectiva de estos (Schulze et al., 2005). La limitada evidencia sobre la relación entre la biomasa de las plantas con algunas variables del suelo (Solis-Dominguez et al., 2012) sugiere que la importancia de las plantas como reguladoras de las condiciones bióticas y abióticas del jal aumenta con la edad y tamaño de la planta, y requiere mayor atención en estudios científicos.

9.3. Potencial fitoestabilizador de las especies

Las especies de estudio difirieron en su respuesta a la adición de composta, tanto en el experimento en condiciones controladas (Figura 10) como en el de campo (Figura 11), y tales respuestas reflejan diferentes limitaciones ecológicas al crecimiento en las especies (Chapin et al., 1987). *A. farnesiana* tuvo mejor desempeño que *P. velutina* en todas las variables en el nivel más bajo de adición de composta. Sin embargo, *A. farnesiana* no modificó su desempeño con los diferentes niveles de adición de composta, mientras que *P. velutina* incrementó su biomasa área y de raíces, y en altura en cada nivel de adición de composta. Esto sugiere que el crecimiento en *P. velutina* está limitado por factores fuertemente influenciados por la adición de composta (MOS, nutrientes, carbono, pH), mientras que el crecimiento en *A. farnesiana* después de una pequeña adición de composta puede estar limitado por otros factores (p. ej. agua en el suelo o toxicidad de metales). Además, estas diferencias en respuestas de crecimiento y limitantes ecológicas pueden ser importantes en la selección de estas especies para practicas de fitoestabilización, dependiendo de los recursos o cantidad de composta disponible o de los objetivos (p. ej. reducir costos en fitoestabilización o desarrollar una cobertura vegetal rápidamente).

En los experimentos de condiciones controladas fue evidente que la adición de composta redujo la concentración de algunos metales en los tejidos de las especies (Anexos XXX y XXXI), como ha sido reportado en otros estudios realizados en suelos de jales (Solis-Dominguez et al., 2012; Gil-Loaiza et al., 2016). Sin embargo, esto ocurrió a pesar del aumento en la concentración de metales en la rizósfera causado por la adición de composta (Anexos XXVII y XXVIII). En los tratamientos sin composta se encontraron niveles tóxicos para las plantas de Cu (*A. farnesiana* y *P. velutina*) y Fe (*P. velutina*) en tejidos (> 20 y > 500 mg/Kg respectivamente; Amberger, 1988; Mendez & Meier, 2008; Anexos XXX y XXXI), y la adición de composta ayudó a disminuir la concentración de metales en los tejidos por debajo de estos niveles tóxicos. En los tratamientos en campo, solo *P. velutina* alcanzó niveles de Cu tóxicos en sus tejidos, mientras que las plantas de *A. farnesiana* y *P. velutina*, creciendo naturalmente en los parches de vegetación mostraron niveles tóxicos en Cu (Anexo XXXI). Beesley y col. (2013) documentaron un caso similar de aumento en la concentración de algunos metales en el suelo, pero una disminución en la concentración en los tejidos causada por la adición de enmiendas orgánicas. Aun no se conoce un mecanismo que explique este fenómeno (Bolan et al., 2014), pero estudios que profundicen en este tema serán muy importantes para entender mejor las interacciones raíz-suelo en jales. Sin embargo, este fenómeno permitió que metales en tejido vegetal que rebasaban los máximos niveles tolerables (MNT) para animales al estar sembrados en jal, pasaran a niveles no tóxicos con la adición de composta (Cu y Se en *A. farnesiana*, y Al, Fe y Se en *P. velutina*; Anexos XXXIII, XXXIV y XXXXI). Solis-Dominguez y col. (2012) reportaron que en *A. greggi* creciendo en jal enmendado con composta redujo la concentración de Zn por debajo de los MNT para animales. De esta manera, la adición de composta resulta ser una estrategia en prácticas de fitoestabilización que ayudará a evitar la transferencia de ciertos metales a la cadena trófica.

En el experimento de condiciones controladas se encontró que la adición de composta puede hacer que las plantas pasen de ser fitoextractoras a fitoestabilizadoras en algunos metales (Cr, Ni y Sr en *A. farnesiana*, y Cr y Ni en *P. velutina*, Anexos XXXV y XXXVI), aunque se observó el cambio inverso en Tl en las dos especies. Este patrón es resultado de los cambios inversos entre las concentraciones de estos metales en el suelo y en el tejido vegetal causados por la adición de composta. Este resultado resalta aún más la utilidad de la composta como herramienta para la fitoestabilización de jales mineros.

Nuestros resultados sugieren que *A. farnesiana* presenta mayor potencial para ser usada en prácticas de fitoestabilización en los jales de Nacozari, en comparación con *P. velutina*, de acuerdo a los siguientes criterios: a) *A. farnesiana* mostró mejores respuestas de crecimiento a niveles bajos de adición de composta, en comparación con *P. velutina*. b) *A. farnesiana* no alcanzó niveles tóxicos de metales en sus tejidos cuando se le adicionó composta, mientras que *P. velutina* sí, incluso con adición de composta (Anexos XXX, XXXI y XXXXI). c) *A. farnesiana* no presentó niveles de metales en tejido por encima de los máximos niveles tolerables para animales cuando se le adicionó composta, mientras que *P. velutina* sí. d) *A. farnesiana* presentó valores más bajos del factor de acumulación en el experimento en campo en comparación con *P. velutina* que presentó valores muy altos para varios metales (Anexo XXXV y XXXVI).

X. CONCLUSIÓN

- En un estudio previo no se encontraron diferencias en parámetros fisicoquímicos del sustrato (metales del sustrato, el pH, la CE y la textura del suelo) en áreas con vegetación y desprovistas de vegetación en el jal de Nacozari (Santos et al., 2017). En el presente estudio, las áreas con vegetación mostraron mayor contenido de materia orgánica, carbono total y nitrógeno total que las áreas desprovistas de vegetación, donde el contenido fue muy bajo, incluso debajo de los límites de detección. Esto sugiere que el contenido de nutrientes y materia orgánica puede ser un limitante ecológico al desarrollo de plantas en los jales.
- La adición de composta fue necesaria para que pudiera ocurrir la germinación y el establecimiento de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el depósito de jales (experimento de campo).
- Las mezclas de jal-composta de menor concentración de composta para el experimento bajo condiciones controladas y de campo (2.5% y 10%) favorecieron más notoriamente al desarrollo de *A. farnesiana*, mientras que las mezclas con mayor concentración (10% y 20%) a *P. velutina*.
- La adición de composta causó un aumento inmediato del pH, pasando el sustrato de tener un pH fuertemente ácido a uno poco o moderadamente alcalino. Además, aumentó la actividad microbiana del sustrato, que junto con los cambios en pH pudieran ser importantes para favorecer el ciclo de los nutrientes en el depósito de jales.
- La adición de composta aumentó la concentración de metales en la rizósfera, la concentración de metales en tejido disminuyó en algunos metales, lo que causó que las plantas pasaran de ser fitoextractoras a fitoestabilizadoras, al menos en Cr, Ni y Sr.
- Ambas especies tienen potencial fitoestabilizador. Sin embargo, *A. farnesiana* puede ser una mejor opción debido a que los metales en sus tejidos no rebasaron los niveles fitotóxicos y MNT para animales, cuando creció en jales adicionados con composta. Además, mostró menores factores de acumulación de metales y mayor capacidad de modificar las condiciones fisicoquímicas del sustrato en comparación con *P. velutina*.
- Es un hecho que los depósitos de jales presentan condiciones fuertemente limitantes para el establecimiento de las plantas. Sin embargo, la adición de nutrientes, materia orgánica y modificación del pH en este tipo de sustrato facilita el establecimiento de especies en este tipo de ambientes.

XI. RECOMENDACIONES

La mayoría de las investigaciones hechas en el tema de la fitoestabilización analizan la respuesta y potencial de especies particulares a condiciones de jales y otros tratamientos. Sin embargo, en realidad muy pocas investigaciones llegan a indagar en los mecanismos específicos que le permiten a una especie tener un mejor potencial como fitoestabilizadora sobre otras especies. Por otro lado, también se desconocen los mecanismos de interacción entre composta-metales-planta que pueden generar respuestas específicas, como el patrón detectado en este estudio, en donde la composta aumentó la concentración de metales de la rizósfera, pero disminuyó los de los tejidos, lo que ha sido muy poco documentado en la literatura. Investigaciones en estos temas permitirán tener mejores bases para el manejo de especies para la fitoestabilización, y definitivamente, mejoraría la efectividad de éstas prácticas.

Se deben seguir evaluando el potencial fitoestabilizador de otras especies nativas, en especial de otras formas de crecimiento (p. ej. pastos) que puedan complementar la función de las especies del presente estudio. También, es deseable que las investigaciones evalúen cuáles especies fungen como especies pioneras en la colonización natural de los jales. Estas investigaciones permitirán en un futuro tener mejor manejo de la biodiversidad para su aprovechamiento en la fitoestabilización de los jales mineros.

XII. ANEXOS

Anexo I. Carbono total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).

Tratamiento	Profundidad (cm)		Normalidad	Prueba estadística	
	0-10	10-20		t	valor p
Arbusto	1.40 ± 0.40	0.23 ± 0.13	si	-5.48	0.0015
Claro entre arbustos	0.13 ± 0.05	0.09 ± 0.03	si	-1.16	0.2896
Lejos de parches	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.01	si	-1.40	0.2110

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo II. Carbono total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).

Profundidad (cm)	Tratamientos			Normalidad	Transformación	Prueba estadística	
	Arbustos	Claro entre arbustos	Lejos de parches			F	valor p
0-10	1.4 ± 0.4 a	0.13 ± 0.05 b	0.07 ± 0.02 b	no	Log	40.56	<0.0001
10-20	0.23 ± 0.13 a	0.09 ± 0.03 b	0.05 ± 0.01 b	si		6.60	0.0172

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo III. Nitrógeno total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).

Tratamiento	Profundidad (cm)		Normalidad	Prueba estadística	
	0-10	10-20		t	valor p
Arbusto	0.11 ± 0.03	0.03 ± 0.01	si	-3.46	0.0258
Claro entre arbustos	0.03 ± 0.01	0.03	si	-0.58	0.6667
Lejos de parches	<0.017	<0.017			

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo IV. Nitrógeno total (%) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).

Profundidad (cm)	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	Arbustos	Claro entre arbustos	Lejos de parches		t	valor p
0-10	0.11 ± 0.03	0.03 ± 0.01	<0.017	Si	3.33	0.0291
10-20	0.03 ± 0.01	0.03	<0.017	Si	0.00	1.0000

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo V. Fósforo disponible (mg/Kg) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación (bajo arbustos y en claros entre los arbustos) y lejos de los parches de vegetación, a dos profundidades (0-10, 10-20 cm).

Tratamiento	Profundidad (cm)		Normalidad	Prueba estadística	
	0-10	10-20		t	valor p
Arbusto	13.93 ± 7.3	7.21 ± 3.95	si	-1.62	0.1566
Claro entre arbustos	6.47 ± 4.22	5.74 ± 2.78	si	-0.29	0.7839
Lejos de parches	4.35 ± 1.42	3.96 ± 1.87	si	-0.34	0.7486

Anexo VI. Fósforo disponible (mg/Kg) en muestras tomadas dentro de los parches de vegetación a dos profundidades (0-10, 10-20 cm) en los diferentes sitios (bajo arbustos, en claros entre los arbustos y lejos de los parches de vegetación).

Profundidad (cm)	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	Arbustos	Claro entre arbustos	Lejos de parches		F	valor p
0-10	13.93 ± 7.30	6.47 ± 4.22	4.35 ± 1.42	si	4.15	0.0527
0-20	7.21 ± 3.95	5.74 ± 2.78	3.96 ± 1.87	si	1.19	0.3484

Anexo VII. Respuesta de *A. farnesiana*: biomasa y otros parámetros bajo condiciones controladas, en los diferentes tratamientos con concentración de composta.

	Tratamientos				Norma- lidad	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.5 %	5 %	10 %		F/X ² *	valor p	
Hojas (g)	0.03 ± 0.02 b	0.16 ± 0.02 a	0.10 ± 0.03 a	0.18 ± 0.03 a	si	36.89	< 0.0001	0.44 ± 0.18
Tallo (g)	0.02 ± 0.01 b	0.12 ± 0.02 a	0.10 ± 0.01 a	0.11 ± 0.02 a	si	43.31	< 0.0001	0.35 ± 0.15
Raíz (g)	0.04 ± 0.01 b	0.12 ± 0.03 a	0.10 ± 0.02 a	0.09 ± 0.04 a	si	7.12	0.0030	0.26 ± 0.13
Biomasa aérea (g)	0.06 ± 0.03 b	0.29 ± 0.03 a	0.26 ± 0.04 a	0.29 ± 0.04 a	si	52.13	< 0.0001	0.78 ± 0.33
Traíz : vástago	0.71 ± 0.24 a	0.42 ± 0.11 b	0.36 ± 0.05 b	0.34 ± 0.16 b	si	5.98	0.0060	0.34 ± 0.14
Altura (cm)	5.00 ± 1.20 b	11.9 ± 2.13 a	12.00 ± 0.98 a	12.50 ± 1.84 a	si	23.4	< 0.0001	20.60 ± 5.97
Germinación (%)	100.00 ± 0.00 a	68.57 ± 17.9 b	100.00 ± 0.00 a	90.00 ± 22.36 ab		17.52*	0.0410	84.30 ± 22.8
Establecimiento (%)	94.29 ± 12.78	93.33 ± 9.13	90.00 ± 22.4	90.00 ± 22.36		11.20*	0.2620	100.00 ± 0.00

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo VIII. Respuesta de *P. velutina*: biomasa y otros parámetros bajo condiciones controladas, en los diferentes tratamientos con concentración de composta.

	Tratamientos				Norma- lidad	Transfor- mación	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.5 %	5 %	10 %			F/ χ^2 *	valor p	
Hojas (g)	0.04 ± 0.01 c	0.08 ± 0.02 bc	0.16 ± 0.07 b	0.38 ± 0.11 a	si		25.31	<0.0001	0.55 ± 0.12
Tallo (g)	0.04 ± 0.02 c	0.10 ± 0.04 bc	0.13 ± 0.02 b	0.25 ± 0.07 a	si		20.6	<0.0001	0.42 ± 0.12
Raíz (g)	0.05 ± 0.01 c	0.12 ± 0.05 bc	0.19 ± 0.03 ba	0.23 ± 0.06 a	si		16.53	<0.0001	0.39 ± 0.07
Biomasa aérea (g)	0.08 ± 0.02 c	0.17 ± 0.05 bc	0.29 ± 0.08 b	0.63 ± 0.18 a	si		26.02	<0.0001	0.97 ± 0.23
Raíz : vástago	0.57 ± 0.07 ab	0.68 ± 0.15 a	0.66 ± 0.13 a	0.38 ± 0.13 b	si		6.07	0.0058	0.41 ± 0.06
Altura (cm)	4.62 ± 0.88 c	8.34 ± 1.66 b	9.64 ± 2.56 ab	14.40 ± 5.28 a	no	log	8.41	0.0014	21.44 ± 3.65
Germinación (%)	80.00 ± 27.39 a	62.86 ± 7.82 b	68.60 ± 20.60 ab	67.10 ± 9.58 ab			21.20*	0.0118	90.00 ± 22.36
Establecimiento (%)	100.00 ± 0.00	86.00 ± 12.90	86.00 ± 21.90	100.00 ± 0.00			12.80*	0.1719	100.00 ± 0.00

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo IX. Comparación de la respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 0 % composta y 100 % jal bajo condiciones controladas.

	Especies		Normalidad	Prueba estadística	
	<i>A. Farnesiana</i>	<i>P. Velutina</i>		t/ χ^2 *	valor p
Hojas (g)	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.01	si	0.67	0.5211
Tallo (g)	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.02	si	1.89	0.0960
Raíz (g)	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01	si	1.36	0.2100
Biomasa aérea (g)	0.06 ± 0.03	0.08 ± 0.02	si	1.47	0.1793
Raíz : vástago	0.71 ± 0.24	0.57 ± 0.07	si	-1.22	0.2568
Altura (cm)	5.00 ± 1.20	4.62 ± 0.88	si	-0.57	0.5835
Germinación (%)	100.00 ± 0.00	80.00 ± 27.39		2.50*	0.1138
Establecimiento (%)	94.28 ± 12.78	100.00 ± 0.00		1.11*	0.2918

Anexo X. Comparación de la respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 2.5 % composta y 97.5 % jal bajo condiciones controladas.

	Especies		Normalidad	Transformación	Prueba estadística	
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>			t/ χ^2 *	valor p
Hojas (g)	0.16 ± 0.02	0.08 ± 0.02	si		-6.19	0.0003
Tallo (g)	0.12 ± 0.02	0.10 ± 0.04	si		-1.53	0.1650
Raíz (g)	0.12 ± 0.03	0.12 ± 0.05	no	log	-0.06	0.9547
Biomasa aérea (g)	0.29 ± 0.03	0.17 ± 0.05	si		-4.34	0.0025
Raíz : vástago	0.42 ± 0.11	0.68 ± 0.15	si		3.13	0.0141
Altura (cm)	11.90 ± 2.13	8.34 ± 1.66	si		-2.95	0.0183
Germinación (%)	68.57 ± 17.93	62.90 ± 7.82			7.33*	0.0620
Establecimiento (%)	93.33 ± 9.12	86.00 ± 12.94			5.20*	0.1577

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XI. Comparación de la respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 5 % composta y 95 % jal bajo condiciones controladas.

	Especies		Normalidad	Prueba estadística	
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>		t/ χ^2 *	valor p
Hojas (g)	0.14 ± 0.03	0.16 ± 0.07	si	0.47	0.6528
Tallo (g)	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.02	si	1.07	0.3176
Raíz (g)	0.09 ± 0.02	0.18 ± 0.03	si	5.03	0.0010
Biomasa aérea (g)	0.26 ± 0.04	0.29 ± 0.08	si	0.71	0.4987
Raíz : vástago	0.36 ± 0.05	0.66 ± 0.13	si	4.57	0.0018
Altura (cm)	11.78 ± 0.98	9.64 ± 2.26	si	-1.95	0.0875
Germinación (%)	100.00 ± 0.00	68.60 ± 20.58		6.67*	0.0357
Establecimiento (%)	90 ± 22.36	86 ± 21.91		1.14*	0.5647

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XII. Comparación de la respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 10 % composta y 90 % jal bajo condiciones controladas.

	Especies		Normalidad	Transformación	Prueba estadística	
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>			t/ X ² *	valor p
Hojas (g)	0.18 ± 0.03	0.37 ± 0.11	si		3.77	0.0055
Tallo (g)	0.11 ± 0.02	0.25 ± 0.07	si		4.26	0.0028
Raíz (g)	0.09 ± 0.04	0.23 ± 0.06	si		4.10	0.0034
Biomasa aérea (g)	0.29 ± 0.04	0.63 ± 0.02	si		4.03	0.0038
Raíz : vástago	0.34 ± 0.16	0.38 ± 0.13	si		0.50	0.6277
Altura (cm)	12.50 ± 1.84	14.40 ± 5.28	no	inversa	0.73	0.4877
Germinación (%)	90.00 ± 22.36	67.10 ± 9.58			8.00*	0.0138
Establecimiento (%)	90.00 ± 22.36	100.00 ± 0.00			1.11*	0.2918

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XIII. Respuesta de *A. farnesiana*: biomasa y otros parámetros bajo condiciones de campo, en los diferentes tratamientos con concentración de composta. En el tratamiento 0 % no se registraron datos debido al nulo establecimiento.

	Tratamientos			Normalidad	Transformación	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %			t/X ² *	valor p
Hojas (g)		0.10 ± 0.03	0.14 ± 0.02	si		1.95	0.0868
Tallo (g)		0.05 ± 0.02	0.09 ± 0.03	si		2.46	0.0394
Raíz (g)		0.14 ± 0.21	0.07 ± 0.02	no	log	0.07	0.9434
Biomasa aérea (g)		0.16 ± 0.05	0.23 ± 0.04	si		2.38	0.0444
Raíz : vástago		0.84 ± 1.29	0.29 ± 0.06	no	inversa	0.21	0.8395
Altura (cm)		8.50 ± 2.00	10.6 ± 0.82	no		2.17	0.0616
Área foliar		20.83 ± 7.27	28.37 ± 4.91	si		1.92	0.0907
Germinación (%)	33.33 ± 22.22 b	66.67 ± 27.22 ab	76.67 ± 16.10 a			15.923*	0.0142
Establecimiento (%)	0.00 ± 0.00	45.00 ± 41.61	46.67 ± 44.31			12.30*	0.0556

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XIV. Respuesta de *P. velutina*: biomasa y otros parámetros bajo condiciones de campo, en los diferentes tratamientos con concentración de composta. En el tratamiento 0 % no se registraron datos debido al nulo establecimiento.

	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %		t/ χ^2 *	valor p
Hojas (g)		0.15 ± 0.09	0.26 ± 0.05	si	2.38	0.0449
Tallo (g)		0.12 ± 0.06	0.22 ± 0.05	si	2.51	0.0362
Raíz (g)		0.11 ± 0.06	0.16 ± 0.04	si	1.43	0.1898
Biomasa aérea (g)		0.28 ± 0.14	0.48 ± 0.09	si	2.64	0.0298
Raíz : vástago		0.47 ± 0.19	0.34 ± 0.1	si	-1.35	0.2127
Altura (cm)		8.4 ± 2.77	12.6 ± 2.82	si	2.38	0.0447
Área foliar		30.3 ± 7.74	51.6 ± 13.12	si	3.13	0.0141
Germinación (%)	63.33 ± 24.60	53.33 ± 32.2	76.67 ± 27.44		9.25*	0.1600
Establecimiento (%)	0.00 ± 0.00 b	40.00 ± 45.95 a	53.33 ± 47.66 a		14.977*	0.0204

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XV. Comparación de respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 0 % composta y 100 % jal bajo condiciones de campo.

Germinación (%)	Especies		Prueba estadística	
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>	χ^2	valor p
	33.33 ± 22.22	63.33 ± 24.6	6.29	0.0985

Anexo XVI. Comparación de respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 10 % composta y 90 % jal bajo condiciones de campo.

	Especies			Prueba estadística		
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>	Normalidad	Transformación	t/ χ^2 *	valor p
Hojas (g)	0.1 ± 0.03	0.15 ± 0.09	si		1.22	0.2552
Tallo (g)	0.05 ± 0.02	0.12 ± 0.06	no		2.45*	0.1172
Raíz (g)	0.14 ± 0.21	0.11 ± 0.06	no	log	0.60	0.5637
Biomasa aérea (g)	0.16 ± 0.05	0.28 ± 0.14	si		3.14	0.1145
Raíz : vástago	0.84 ± 1.29	0.47 ± 0.19	no	inversa	-1.01	0.3438
Altura (cm)	8.5 ± 2	8.4 ± 2.77	no		0.18*	0.6674
Área foliar	20.83 ± 7.27	30.3 ± 7.74	si		1.99	0.0811
Germinación (%)	66.67 ± 27.22	53.33 ± 32.2			4.40*	0.2214
Establecimiento (%)	45 ± 41.61	40 ± 45.95			3.64*	0.3025

Anexo XVII. Comparación de respuesta de *A. farnesiana* y *P. velutina* en el tratamiento 20 % composta y 80 % jal bajo condiciones de campo.

	Especies		Normalidad	Transformación	Prueba estadística	
	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>			t/X ² *	valor p
Hojas (g)	0.14 ± 0.02	0.26 ± 0.05	no	log	6.33	0.0002
Tallo (g)	0.09 ± 0.03	0.22 ± 0.05	si		4.53	0.0019
Raíz (g)	0.07 ± 0.02	0.16 ± 0.04	si		5.12	0.0009
Biomasa aérea (g)	0.23 ± 0.04	0.48 ± 0.09	si		5.43	0.0006
Raíz : vástago	0.29 ± 0.06	0.34 ± 0.10	no	log	1.05	0.3257
Altura (cm)	10.60 ± 0.82	12.60 ± 2.82	si		1.52	0.1658
Área foliar	28.37 ± 4.91	51.60 ± 13.12	si		3.71	0.0060
Germinación (%)	76.67 ± 16.10	76.67 ± 27.44			4.10*	0.1287
Establecimiento (%)	46.67 ± 44.31	53.33 ± 47.66			2.476*	0.4796

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XVIII. Comparación del pH en los distintos tratamientos sin siembra.

Tiempo	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %		F	valor p
Inicio	5.02 ± 0.27 b	8.01 ± 0.26 a	7.8 ± 0.07 a	si	168.49	<0.0001
Final	5.16 ± 0.06 b	8.27 ± 0.19 a	8.47 ± 0.05 a	si	731.8	<0.0001

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XIX. Comparación del pH del inicio y final del experimento de campo en los distintos tratamientos sin siembra.

Tratamiento	Tiempo		Normalidad	Prueba estadística	
	Inicio	Final		t	valor p
0 %	5.02 ± 0.27	5.16 ± 0.06	si	0.85	0.4442
10 %	8.01 ± 0.26	8.27 ± 0.19	si	1.38	0.2385
20 %	7.8 ± 0.07	8.47 ± 0.05	si	13.68	0.0002

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XX. Comparación del pH al final del experimento en la rizósfera de las distintas especies y en tratamientos sin siembra.

Especies	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %		F/t*	valor p
<i>A. farnesiana</i>		7.8 ± 0.05	8.3 ± 0.15	si	5.43*	0.0056
<i>P. velutina</i>		8.22 ± 0.25	8.33 ± 0.16	si	0.64	0.5582
Sin siembra	5.16 ± 0.06 b	8.27 ± 0.19 a	8.47 ± 0.05 a	si	731.8	<0.0001

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXI. Comparación de la conductividad eléctrica (CE) en los distintos tratamientos sin siembra.

Tiempo	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %		F	valor p
Inicio	92.58 ± 17.4 b	420.17 ± 151.23 a	527.67 ± 6.66 a	si	19.91	0.0022
Final	50.3 ± 6.69 c	166.4 ± 20.56 b	275.67 ± 40.76 a	si	53.7	0.0001

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXII. Comparación de la CE del inicio y final del experimento de campo en los distintos tratamientos sin siembra.

Tratamiento	Tiempo		Normalidad	Prueba estadística	
	Inicio	Final		t	valor p
0 %	92.58 ± 17.4	50.3 ± 6.69	si	-3.93	0.0171
10 %	420.17 ± 151.23	166.4 ± 20.56	si	-2.88	0.0450
20 %	527.67 ± 6.66	275.67 ± 40.76	si	-10.57	0.0005

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXIII. Comparación de la CE al final del experimento en la rizósfera de las distintas especies y en tratamientos sin siembra.

Especie	Tratamientos			Normalidad	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %		F/t*	valor p
<i>A. farnesiana</i>		131.25 ± 5.43	269 ± 15	Si	14.96*	0.0001
<i>P. velutina</i>		187.52 ± 13.76	258 ± 14.31	Si	6.15*	0.0035
Sin siembra	50.3 ± 6.69 c	166.4 ± 20.56 b	275.67 ± 40.76 a	Si	53.7	0.0001

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXIV. Mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$) acumulada en tratamientos sin siembra. Mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$) a partir de la mineralización de carbono según Isermeyer (Alef, 1995), acumulada por 13 días, en muestras de distintos tratamientos sin siembra y en distintos tiempos de colecta del experimento en campo.

Tratamiento	Tiempo		Normalidad	Prueba estadística	
	Inicio	Final		t	valor p
0 %	8.88 \pm 2.71	8.72 \pm 7.35	Si	-0.03	0.9742
20 %	169.85 \pm 4.84	84.66 \pm 11.65	Si	-11.69	0.0003

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXV. Influencia de plantas en mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$). Mineralización del carbono ($\mu\text{gC g}^{-1}$) acumulada por 13 días, en muestras de la rizósfera de las distintas especies crecidas en el tratamiento 20 % composta, comparada con la respiración basal del tratamiento control (0 % sin siembra) en muestras del tiempo inicial y final.

Inicio Sin siembra 0 %	Final Sin siembra 0 %	Final <i>A. farnesiana</i> 20 %	Final <i>P. velutina</i> 20 %	Normalidad	Prueba estadística	
					F	valor p
8.88 \pm 2.71 b	84.66 \pm 11.65 a	72.65 \pm 3.85 a	78.72 \pm 21.32 a	si	24.33	0.0002

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXVI. Porcentaje de recuperación de estándares control y certificados en técnica de ICP-OES. CWW TM se refiere a Certified Waste Water y las diferentes letras son diferentes soluciones de los estándares certificados de alta pureza (High-purity standards).

Metal	CWW TM C			CWW TM G			CWW TM F			CWW TM H			NIST 1515			NIST 2702		
	Valor real	Valor medido	% REC	Valor real	Valor medido	% REC	Valor real	Valor medido	% REC	Valor real	Valor medido	% REC	Valor real	Valor medido	% REC	Valor real	Valor medido	% REC
Al	0.500	0.428	85.60	1.000	0.851	85.10	0.025	0.027	108.00	0.100	0.099	99.00	286.000	148.545	51.94	84100.000	25298.246	30.08
Sb	0.150	0.142	94.67	0.005	-0.002	-40.00	0.250	0.216	86.40	0.200	0.156	78.00	0.013	0.241	1854.46	5.600	7.672	137.01
As	0.150	0.149	99.33	0.250	0.251	100.40	0.005	0.005	100.00	0.100	0.096	96.00	0.038	-9.452	-24872.79	45.300	5.879	12.98
Ba	0.500	0.496	99.20	0.025	0.020	80.00	1.000	0.966	96.60	0.100	0.096	96.00	49.000	28.426	58.01	397.400	129.534	32.59
Be	0.150	0.148	98.67	0.250	0.250	100.00	0.005	0.004	80.00	0.020	0.022	110.00	0.000	-0.486	0.00	3.000	-0.697	-23.25
Cd	0.150	0.149	99.33	0.250	0.252	100.80	0.005	0.003	60.00	0.100	0.097	97.00	0.013	-0.486	-3736.14	0.817	40.953	5012.55
Cr	0.500	0.483	96.60	0.025	0.023	92.00	1.000	0.954	95.40	0.500	0.475	95.00	0.300	4.847	1615.66	352.000	259.054	73.59
Co	0.500	0.491	98.20	1.000	0.993	99.30	0.025	0.021	84.00	0.500	0.477	95.40	0.090	-1.457	-1618.99	27.760	23.914	86.145
Cu	0.500	0.474	94.80	0.025	0.029	116.00	1.000	0.924	92.40	0.500	0.457	91.40	5.640	7.524	133.40	117.700	129.128	109.71
Fe	0.500	0.493	98.60	1.000	0.992	99.20	0.025	0.019	76.00	0.250	0.237	94.80	83.000	60.245	72.58	0.000	11478.519	0.00
Pb	0.500	0.479	95.80	0.025	0.025	100.00	1.000	0.951	95.10	0.50	0.470	94.00	0.470	0.240	51.15	132.800	100.339	75.56
Mn	0.500	0.505	101.00	1.000	1.012	101.20	0.025	0.019	76.00	0.100	0.095	95.00	54.000	34.743	64.34	1757.000	1152.451	65.59
Mo	0.500	0.487	97.40	1.000	0.988	98.80	0.025	0.024	96.00	0.100	0.094	94.00	0.094	0.241	256.47	10.800	5.281	48.90
Ni	0.500	0.492	98.40	0.250	0.248	99.20	1.000	0.959	95.90	0.500	0.477	95.40	0.910	0.970	106.64	75.400	57.291	75.98
Se	0.150	0.162	108.00	0.250	0.285	114.00	0.005	0.008	160.00	0.050	0.061	122.00	0.050	3.152	6304.54	4.950	-32.483	-656.22
Ag	0.150	0.142	94.67	0.005	0.005	100.00	0.250	0.233	93.20	0.020	0.019	95.00	0.000	0.969	0.00	0.622	-3.788	-609.06
Sr	0.500	0.51	102.00	1.000	0.994	99.40	0.025	0.02	80.00	0.100	0.100	100.00	25.000	10.451	41.80	119.700	54.006	45.12
Tl	0.150	0.146	97.33	0.005	0.002	40.00	0.025	0.024	96.00	0.250	0.226	90.40	0.000	3.631	0.00	0.827	-14.451	-1748.03
V	0.500	0.488	97.60	1.000	0.985	98.50	0.025	0.021	84.00	0.500	0.478	95.60	0.260	-0.727	-279.53	357.600	283.878	79.38
Zn	0.500	0.499	99.80	0.025	0.018	72.00	1.000	0.995	99.50	0.500	0.485	97.00	12.500	11.176	89.41	485.300	414.888	85.49

Valor real y valor medido ($\mu\text{g/mL}$) o mg/Kg . NIST 1515, NIST 2702. El porcentaje de recuperación aceptable es entre 85 y 115 %. Valores en negrita indican que se encontraron dentro del porcentaje de recuperación aceptable.

Anexo XXVII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *A. farnesiana* bajo condiciones controladas.

Metal	Tratamientos				Norma- lidad	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.5 %	5 %	10 %		F/t*	valor p	
Al	10455.46 ± 1466.05	11877.82 ± 2262.31	12971.25 ± 1602.93	12946.62 ± 1705.09	si	1.33	0.3321	24486.59 ± 818.07
Sb	2.04 ± 1.03	3.11 ± 1.87	3.11 ± 0.42	3.99 ± 0.7	si	1.46	0.2971	1.72 ± 0.04
As	12.45 ± 1	12.7 ± 1.84	11.15 ± 1.13	11.27 ± 1.08	si	1.11	0.3984	BLD
Ba	67.91 ± 5.33 c	84.56 ± 0.74 b	98.34 ± 1.74 ab	105.93 ± 11.01 a	si	21.91	0.0003	269.78 ± 4.07
Be	0.23 ± 0	0.20 ± 0.07	0.16 ± 0.08	0.15 ± 0.06	si	1.09	0.4088	BLD
Cd	8.69 ± 0.5 b	11.08 ± 0.46 a	11.12 ± 0.6 a	12.34 ± 0.5 a	si	26.24	0.0002	20.09 ± 0.27
Cr	2.53 ± 0.04 c	3.86 ± 0.43 b	4.36 ± 0.25 b	5.91 ± 0.52 a	si	45.22	<0.0001	6.62 ± 0.25
Co	BLD	BLD	0.04 ± 0.07	0.53 ± 0.05	si	-10.47*	0.0005	12.21 ± 0.1
Cu	240.03 ± 8.76 c	340.05 ± 10.22 a	308.16 ± 17.3 b	312.13 ± 1.14 ab	si	44.96	<0.0001	49.34 ± 3.68
Fe	6550.6 ± 209.17	6944.48 ± 226.78	6753.97 ± 218.64	6780.22 ± 199.24	si	1.71	0.2409	7859.53 ± 36.53
Pb	33.46 ± 1.89 b	38.62 ± 2.77 ab	42.99 ± 4.3 a	44.25 ± 1.25 a	si	9.15	0.0058	7.21 ± 0.21
Mn	43.69 ± 4.9 c	62.53 ± 8.39 b	78.74 ± 8.7 b	99.93 ± 4.32 a	si	36.35	<0.0001	397.51 ± 9.62
Mo	68.13 ± 1.77	80.89 ± 12.05	73.01 ± 4.1	70.2 ± 0.16	si	2.27	0.1571	BLD
Ni	0.64 ± 0.13 c	0.94 ± 0.19 bc	1.42 ± 0.19 b	2.21 ± 0.29 a	si	32.37	<0.0001	6.15 ± 0.06
Se	BLD	BLD	BLD	BLD				BLD
Ag	4.36 ± 0.15 b	4.97 ± 0.17 a	5.07 ± 0.19 a	4.88 ± 0.14 a	si	11.09	0.0032	0 ± 0
Sr	5.66 ± 0.31 d	11.08 ± 0.52 c	16.76 ± 0.65 b	29.6 ± 1.08 a	si	651.12	<0.0001	316.66 ± 10.46
Tl	1.86 ± 0.13 a	1.63 ± 0.2 a	0.97 ± 0.22 b	0.4 ± 0.07 ²	si	17.8	0.003	0 ± 0
V	5.91 ± 1.55 b	6.78 ± 2.36 b	9.31 ± 1.15 ab	12 ± 2.29 a	si	6.21	0.0174	102.71 ± 1.24
Zn	41.28 ± 5.12 b	46.8 ± 3.13 b	50.5 ± 3.55 ab	56.76 ± 1.56 a	si	9.95	0.0045	110.95 ± 1.99

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²), indican el número de réplicas. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa

Anexo XXVIII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *P. velutina* bajo condiciones controladas.

Metal	Tratamientos				Norma- lidad	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.50 %	5 %	10 %		F/t*/X ² **	valor p	
Al	8123.43 ± 3581.44	12060.54 ± 1536.58	12040.93 ± 2510.6	12886.01 ± 2109	si	2.12	0.1763	23806.52 ± 2653.83
Sb	1.68 ± 0.67	2.73 ± 0.87	3.26 ± 0.42	3.37 ± 0.83	si	3.48	0.0705	1.33 ± 0.60
As	12.77 ± 1.74	12.24 ± 0.4	12.35 ± 1.97	11.42 ± 1.12	si	0.46	0.7196	BLD
Ba	75.58 ± 6.49	81.43 ± 11.75	85.07 ± 6.69	95.10 ± 10.06	si	2.47	0.1362	275.44 ± 7.57
Be	0.15 ± 0.07	0.23 ± 0.01	0.12 ± 0.00	0.11 ± 0.01	no	7.61**	0.0547	0.21 ¹
Cd	7.92 ± 1.42 c	9.92 ± 0.71 bc	10.95 ± 0.6 ab	12.29 ± 0.3 a	si	13.71	0.0016	20.32 ± 0.54
Cr	3.03 ± 0.72 c	3.44 ± 0.27 bc	4.32 ± 0.24 b	5.53 ± 0.05 a	si	22.31	0.0003	6.54 ± 0.38
Co	BLD	BLD	0.00 ± 0.00	0.47 ± 0.03	si	-28.26*	<0.0001	11.69 ± 0.90
Cu	213.94 ± 39.72 b	266.7 ± 14.75 ab	291.13 ± 17.63 a	317.71 ± 4.40 a	si	11.02	0.0033	51.36 ± 0.49
Fe	5877.97 ± 1017.31	6642.64 ± 252.36	6991.73 ± 139.25	6492.16 ± 476.14	si	1.93	0.2032	7297.03 ± 699.54
Pb	32.6 ± 4.07 b	46.41 ± 6.79 a	45.44 ± 5.13 a	45.91 ± 1.37 a	si	5.88	0.0202	8.99 ± 1.59
Mn	39.59 ± 13.71 c	59.93 ± 6.34 bc	73.25 ± 7.50 b	97.46 ± 5.69 a	si	22.3	0.0003	400.33 ± 24.20
Mo	59.7 ± 2.50 b	64.94 ± 4.81 ab	70.58 ± 2.09 a	68.82 ± 1.93 a	si	7.45	0.0105	BLD
Ni	1.3 ± 0.94	0.93 ± 0.23	1.32 ± 0.07	2.07 ± 0.04	no	5.77**	0.1234	5.97 ± 0.03
Se	BLD	BLD	BLD	BLD				BLD
Ag	4.03 ± 0.41 b	4.61 ± 0.36 ab	5.00 ± 0.11 a	4.99 ± 0.03 a	si	8.06	0.0084	BLD
Sr	6.51 ± 1.42 d	10.61 ± 0.39 c	16.98 ± 0.88 b	28.92 ± 1.02 a	si	287.53	<0.0001	320.4 ± 15.61
Tl	1.82 ± 0.11 a	1.35 ± 0.33 ab	1.15 ± 0.30 bc	0.54 ± 0.18 c	si	13.88	0.0015	BLD
V	4.8 ± 2.99 b	7.13 ± 1.27 ab	7.98 ± 2.00 ab	11.14 ± 2 a	si	4.43	0.0409	100.71 ± 4.24
Zn	37.64 ± 8.56 b	44.61 ± 3.28 ab	47.83 ± 5.29 ab	55.17 ± 2.49 a	si	5.37	0.0256	104.2 ± 8.32

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXIX. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina* bajo condiciones controladas.

Metal	Tratamiento	Especies		Norma- lidad	Prueba estadística	
		<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>		t	valor p
Al	0 %	10455.46 ± 1466.05	8123.43 ± 3581.44	si	-1.04	0.3555
	2.5 %	11877.82 ± 2262.31	12060.54 ± 1536.58	si	0.12	0.9135
	5 %	12971.25 ± 1602.93	12040.93 ± 2510.6	si	-0.54	0.6173
	10 %	12946.62 ± 1705.09	12886.01 ± 2109	si	-0.04	0.971
Sb	0 %	2.04 ± 1.03	1.68 ± 0.67	si	-0.52	0.631
	2.5 %	3.11 ± 1.87	2.73 ± 0.87	si	-0.32	0.7684
	5 %	3.11 ± 0.42	3.26 ± 0.42	si	0.45	0.6779
	10 %	3.99 ± 0.70	3.37 ± 0.83	si	-0.99	0.3761
As	0 %	12.45 ± 1.00	12.77 ± 1.74	si	0.27	0.7995
	2.5 %	12.70 ± 1.84	12.24 ± 0.40	si	-0.42	0.694
	5 %	11.15 ± 1.13	12.35 ± 1.97	si	0.91	0.4133
	10 %	11.27 ± 1.08	11.42 ± 1.12	si	0.17	0.8724
Ba	0 %	67.91 ± 5.33	75.58 ± 6.49	si	1.58	0.1887
	2.5 %	84.56 ± 0.74	81.43 ± 11.75	si	-0.46	0.6694
	5 %	98.34 ± 1.74	85.07 ± 6.69	si	-3.32	0.0293
	10 %	105.93 ± 11.01	95.10 ± 10.06	si	-1.26	0.2767
Be	0 %	0.23 ± 0.00	0.15 ± 0.07	si	-2.02	0.1138
	2.5 %	0.20 ± 0.07	0.23 ± 0.01	si	0.67	0.5369
	5 %	0.16 ± 0.08	0.12 ± 0.00	si	-0.76	0.4921
	10 %	0.15 ± 0.06	0.11 ± 0.01	si	-1.15	0.3143
Cd	0 %	8.69 ± 0.50	7.92 ± 1.42	si	-0.89	0.4254
	2.5 %	11.08 ± 0.46	9.92 ± 0.71	si	-2.37	0.0768
	5 %	11.12 ± 0.60	10.95 ± 0.60	si	-0.36	0.74
	10 %	12.34 ± 0.5	12.29 ± 0.30	si	-0.16	0.8798
Cr	0 %	2.53 ± 0.04	3.03 ± 0.72	si	1.2	0.2966
	2.5 %	3.86 ± 0.43	3.44 ± 0.27	si	-1.45	0.2209
	5 %	4.36 ± 0.25	4.32 ± 0.24	si	-0.17	0.8755
	10 %	5.91 ± 0.52	5.53 ± 0.05	si	-1.27	0.2727
Co	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	0.04 ± 0.07	0.00 ± 0.00	si	-1	0.3739
	10 %	0.53 ± 0.05	0.47 ± 0.03	si	-1.83	0.1405
Cu	0 %	240.03 ± 8.76	213.94 ± 39.72	si	-1.11	0.3289
	2.5 %	340.05 ± 10.22	266.7 ± 14.75	si	-7.08	0.0021
	5 %	308.16 ± 17.30	291.13 ± 17.63	si	-1.19	0.2982
	10 %	312.13 ± 1.14	317.71 ± 4.40	si	2.12	0.1009
Fe	0 %	6550.60 ± 209.17	5877.97 ± 1017.31	si	-1.12	0.3248
	2.5 %	6944.48 ± 226.78	6642.64 ± 252.36	si	-1.54	0.1982
	5 %	6753.97 ± 218.64	6991.73 ± 139.25	si	1.59	0.1873
	10 %	6780.22 ± 199.24	6492.16 ± 476.14	si	-0.97	0.3885

Pb	0 %	33.46 ± 1.89	32.60 ± 4.07	si	-0.33	0.7566
	2.5 %	38.62 ± 2.77	46.41 ± 6.79	si	1.84	0.1395
	5 %	42.99 ± 4.30	45.44 ± 5.13	si	0.63	0.5602
	10 %	44.25 ± 1.25	45.91 ± 1.37	si	1.57	0.1968
Mn	0 %	43.69 ± 4.90	39.59 ± 13.71	si	-0.49	0.6515
	2.5 %	62.53 ± 8.39	59.93 ± 6.34	si	-0.43	0.6897
	5 %	78.74 ± 8.70	73.25 ± 7.5	si	-0.83	0.4539
	10 %	99.93 ± 4.32	97.46 ± 5.69	si	-0.6	0.5821
Mo	0 %	68.13 ± 1.77	59.7 ± 2.5	si	-4.76	0.0089
	2.5 %	80.89 ± 12.05	64.94 ± 4.81	si	-2.13	0.1003
	5 %	73.01 ± 4.10	70.58 ± 2.09	si	-0.91	0.4129
	10 %	70.20 ± 0.16	68.82 ± 1.93	si	-1.23	0.287
Ni	0 %	0.64 ± 0.13	1.3 ± 0.94	si	1.2	0.2975
	2.5 %	0.94 ± 0.19	0.93 ± 0.23	si	-0.02	0.9813
	5 %	1.42 ± 0.19	1.32 ± 0.07	si	-0.9	0.4168
	10 %	2.21 ± 0.29	2.07 ± 0.04	si	-0.82	0.4578
Se	0 %	BLD	BLD	si		
	2.5 %	BLD	BLD	si		
	5 %	BLD	BLD	si		
	10 %	BLD	BLD	si		
Ag	0 %	4.36 ± 0.15	4.03 ± 0.41	si	-1.32	0.2583
	2.5 %	4.97 ± 0.17	4.61 ± 0.36	si	-1.55	0.195
	5 %	5.07 ± 0.19	5 ± 0.11	si	-0.6	0.5791
	10 %	4.88 ± 0.14	4.99 ± 0.03	si	1.38	0.2391
Sr	0 %	5.66 ± 0.31	6.51 ± 1.42	si	1.02	0.367
	2.5 %	11.08 ± 0.52	10.61 ± 0.39	si	-1.25	0.2803
	5 %	16.76 ± 0.65	16.98 ± 0.88	si	0.34	0.7507
	10 %	29.6 ± 1.08	28.92 ± 1.02	si	-0.8	0.4708
Tl	0 %	1.86 ± 0.13	1.82 ± 0.11	si	-0.35	0.7435
	2.5 %	1.63 ± 0.20	1.35 ± 0.33	si	-1.26	0.2749
	5 %	0.97 ± 0.22	1.15 ± 0.3	si	0.83	0.4533
	10 %	0.40 ± 0.07 ²	0.54 ± 0.18			
V	0 %	5.91 ± 1.55	4.8 ± 2.99	si	-0.57	0.5994
	2.5 %	6.78 ± 2.36	7.13 ± 1.27	si	0.23	0.8298
	5 %	9.31 ± 1.15	7.98 ± 2	si	-1	0.3736
	10 %	12.00 ± 2.29	11.14 ± 2	si	-0.49	0.6483
Zn	0 %	41.28 ± 5.12	37.64 ± 8.56	si	-0.63	0.5614
	2.5 %	46.8 ± 3.13	44.61 ± 3.28	si	-0.84	0.449
	5 %	50.5 ± 3.55	47.83 ± 5.29	si	-0.73	0.508
	10 %	56.76 ± 1.56	55.17 ± 2.49	si	-0.94	0.4009

Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXX. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de *A. farnesiana* bajo condiciones controladas.

Metal	Tratamientos				Norma- lidad	Transfor- mación	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.5 %	5 %	10 %			F/X ² *	valor p	
Al	147.9 ± 121.86	111.25 ± 32.92	90.26 ± 40.9	101.75 ± 10.78	si		0.42	0.7432	143.07 ± 51.25
Sb	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
As	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Ba	BLD	2.15 ± 1.66	BLD	0.49 ¹					3.11 ± 0.67
Be	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Cd	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Cr	14.9 ± 15.95	3.41 ± 0.26	4.78 ± 0.95	5.52 ± 2.85	no	log	0.96	0.4554	2.35 ± 0.94
Co	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Cu	21.89 ± 17.38	8.26 ± 0.83	6.67 ± 1.64	5.51 ± 1.23	no	log	2.00	0.1926	5.4 ± 0.57
Fe	293.97 ± 215.53	257.74 ± 112.51	142.78 ± 42.81	254.56 ± 172.94	si		0.57	0.6525	139.39 ± 32.28
Pb	0.93 ¹	0.61 ± 0.06 ²	0.96 ± 1.02	0.549 ¹					BLD
Mn	4.21 ± 5.95 ²	52.54 ± 15.06 a	19.22 ± 5.99 b	20.18 ± 8.24 b	si		9.79	0.0129	32.15 ± 6.7
Mo	0.31 ± 0.54	1.1 ± 0.77	1.88 ± 0.69	2.67 ± 0.33	no	log	3.46	0.0913	1.25 ± 0.36
Ni	1.8 ± 1.52	1.2 ± 0.7	25.36 ± 42.3	0.87 ± 0.2	no	log	0.67	0.5912	3.98 ± 5.23
Se	5.32 ± 4.69	1.84 ± 0.38	2.26 ± 0.52	2.26 ± 0.52	no		2.59*	0.4593	1.34 ± 0.67
Ag	2.98 ± 3.19	0.62 ± 0.05	0.85 ± 0.2	0.79 ± 0.3	no	log	1.43	0.3031	0.36 ± 0.15
Sr	BLD	21.15 ± 10.95	8.75 ± 4.15	10.89 ± 7.3	si		2.08	0.2063	34.66 ± 5.56
Tl	6.03 ± 4.73	1.82 ± 0.65	2.3 ± 0.79	2.88 ± 1.08	si		1.75	0.2335	1.27 ± 0.95
V	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Zn	20.65 ± 21.2	33.94 ± 11.06	10.55 ± 1.97	6.76 ± 5.22	si		2.94	0.0989	22.02 ± 4.45

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²) indican el número de réplicas. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXI. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de *P. velutina* bajo condiciones controladas.

Metal	Tratamientos				Norma- lidad	Transfor- mación	Prueba estadística		Control positivo
	0 %	2.50 %	5 %	10 %			F/t*	valor p	
Al	233.19 ± 81.47 a	221.72 ± 11.01 a	126.32 ± 16.20 ab	91.47 ± 32.68 b	si		7.28	0.0113	112.9 ± 7.01
Sb	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
As	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Ba	BLD	1.07 ± 0.93	0.66 ± 0.93 ²	1.94 ± 1.92	si		-0.71*	0.5189	4.51 ± 0.4
Be	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Cd	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Cr	18.01 ± 9.39 a	9.91 ± 1.36 ab	4.36 ± 1.4 bc	1.95 ± 1.05 c	no	log	18.14	0.0006	1.52 ± 0.23
Co	BLD	BLD	BLD	BLD					1.46
Cu	50.78 ± 16.07 a	29.84 ± 2.66 ab	11.69 ± 1.52 b	17.49 ± 6.93 ²	si		11.38	0.0029	42.2 ± 26.21 ²
Fe	743.94 ± 314.74 a	451.96 ± 72.02 ab	260.43 ± 54.7 b	195.8 ± 81.75 b	si		6.37	0.0163	107.43 ± 76.74
Pb	1.76 ± 0.97	1.15 ± 0.44	2.18 ± 2.45	0.24 ± 0.2			0.34	0.7251	0.10 ¹
Mn	14.05 ± 8.99 b	178.17 ± 26.37 a	24.61 ± 3.7 b	37.86 ± 4.43 b	si		87.77	<0.0001	55.23 ± 5.5
Mo	1.76 ± 0.97	3.08 ± 0.94	6.84 ± 3.18	7.35 ± 3.64	si		3.63	0.0643	3.82 ± 0.66
Ni	2.19 ± 0.93 a	2.01 ± 0.35 ab	1.38 ± 0.6 ab	0.54 ± 0.34 b	si		4.54	0.0387	1.39 ± 0.15
Se	5.28 ± 2.9 a	3.51 ± 0.53 a	2.16 ± 0.37 ab	1.28 ± 0.5 b	no	log	9.56	0.0051	1.11 ± 0.51
Ag	3.52 ± 1.94 a	1.75 ± 0.27 ab	0.79 ± 0.25 bc	0.37 ± 0.16 c	no	log	17.90	0.0007	0.24 ± 0.04
Sr	BLD	10.19 ± 2.16 b	13.44 ± 6.11 b	31.07 ± 9.15 a	si		9.04	0.0155	45.2 ± 7.66
Tl	7.57 ± 5.9 a	2.29 ± 0.21 ab	1.85 ± 0.65 ab	1.22 ± 0.67 b	no	log	6.07	0.0185	0.77 ± 1.05
V	BLD	BLD	BLD	BLD					BLD
Zn	26.4 ± 15.41 b	85.05 ± 29.45 a	13.47 ± 2.48 b	26.54 ± 26.76 b	si		6.75	0.0139	68.92 ± 15.49

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²), indican el número de réplicas. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXII. Concentración de metales (mg/Kg) en tejido vegetal (hojas) de *A. farnesiana* y *P. velutina* bajo condiciones controladas.

Metal	Trata- mientos	Especies		Normalidad	Prueba estadística	
		<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>		t	valor p
Al	0 %	147.9 ± 121.86	233.19 ± 81.47	si	1.01	0.3706
	2.5 %	111.25 ± 32.92	221.72 ± 11.01	si	5.51	0.0053
	5 %	90.26 ± 40.9	126.32 ± 16.2	si	1.42	0.2286
	10 %	101.75 ± 10.78	91.47 ± 32.68	si	-0.52	0.6322
Sb	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
	10 %	BLD	BLD			
As	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
	10 %	BLD	BLD			
Ba	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	2.15 ± 1.66	1.07 ± 0.93	si	-0.99	0.3795
	5 %	BLD	0.66 ± 0.93 ²			
	10 %	0.49 ± 0 ²	1.94 ± 1.92			
Be	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
	10 %	BLD	BLD			
Cd	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
	10 %	BLD	BLD			
Cr	0 %	14.9 ± 15.95	18.01 ± 9.39	si	0.09	0.7851
	2.5 %	3.41 ± 0.26	9.91 ± 1.36	si	8.11	0.0013
	5 %	4.78 ± 0.95	4.36 ± 1.4	si	-0.43	0.687
	10 %	5.52 ± 2.85	1.95 ± 1.05	si	-2.03	0.1117
Co	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
	10 %	BLD	BLD			
Cu	0 %	21.89 ± 17.38	50.78 ± 16.07	si	2.11	0.102
	2.5 %	8.26 ± 0.83	29.84 ± 2.66	si	13.42	0.0002
	5 %	6.67 ± 1.64	11.69 ± 1.52	si	3.88	0.0178
	10 %	5.51 ± 1.23	17.49 ± 6.93	si	2.95	0.0421
Fe	0 %	293.97 ± 215.53	743.94 ± 314.74	si	2.04	0.1106
	2.5 %	257.74 ± 112.51	451.96 ± 72.02	si	2.52	0.0655
	5 %	142.78 ± 42.81	260.43 ± 54.7	si	2.93	0.0427

Pb	10 %	254.56 ± 172.94	195.8 ± 81.75	si	-0.53	0.6229
	0 %	0.93 ¹	1.76 ± 0.97			
	2.5 %	0.61 ± 0.06 ²	1.15 ± 0.44			
Mn	5 %	0.96 ± 1.02	2.18 ± 2.45	si	0.8	0.4687
	10 %	0.55 ¹	0.24 ± 0.2 ²			
	0 %	4.21 ± 5.95 ²	14.05 ± 8.99			
Mo	2.5 %	52.54 ± 15.06	178.17 ± 26.37	si	7.17	0.002
	5 %	19.22 ± 5.99	24.61 ± 3.7	si	1.33	0.2552
	10 %	20.18 ± 8.24	37.86 ± 4.43	si	3.27	0.0307
Ni	0 %	0.31 ± 0.54	1.76 ± 0.97	si	2.26	0.0863
	2.5 %	1.1 ± 0.77	3.08 ± 0.94	si	2.82	0.0476
	5 %	1.88 ± 0.69	6.84 ± 3.18	si	2.64	0.0577
Se	10 %	2.67 ± 0.33	7.35 ± 3.64	si	2.22	0.0906
	0 %	1.8 ± 1.52	2.19 ± 0.93	si	0.37	0.7279
	2.5 %	1.2 ± 0.7	2.01 ± 0.35	si	1.79	0.1479
Ag	5 %	25.36 ± 42.3	1.38 ± 0.6	si	-0.98	0.3818
	10 %	0.87 ± 0.2	0.54 ± 0.34	si	-1.45	0.2203
	0 %	5.32 ± 4.69	5.28 ± 2.9	si	-0.01	0.9894
Sr	2.5 %	1.84 ± 0.38	3.51 ± 0.53	si	4.44	0.0114
	5 %	2.26 ± 0.52	2.16 ± 0.37	si	-0.28	0.7946
	10 %	2.26 ± 0.52	1.28 ± 0.5	si	-2.35	0.0783
Tl	0 %	2.98 ± 3.19	3.52 ± 1.94	si	0.25	0.8152
	2.5 %	0.62 ± 0.05	1.75 ± 0.27	si	7.26	0.0019
	5 %	0.85 ± 0.2	0.79 ± 0.25	si	-0.3	0.7767
V	10 %	0.79 ± 0.3	0.37 ± 0.16	si	-2.09	0.1043
	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	21.15 ± 10.95	10.19 ± 2.16	si	-1.7	0.1642
Zn	5 %	8.75 ± 4.15	13.44 ± 6.11	si	1.1	0.3333
	10 %	10.89 ± 7.3	31.07 ± 9.15	si	2.99	0.0404
	0 %	6.03 ± 4.73	7.57 ± 5.9	si	0.35	0.7421
Zn	2.5 %	1.82 ± 0.65	2.29 ± 0.21	si	1.16	0.3096
	5 %	2.3 ± 0.79	1.85 ± 0.65	si	-0.77	0.4822
	10 %	2.88 ± 1.08	1.22 ± 0.67	si	-2.26	0.0865
Zn	0 %	BLD	BLD			
	2.5 %	BLD	BLD			
	5 %	BLD	BLD			
Zn	10 %	BLD	BLD			
	0 %	20.65 ± 21.2	26.4 ± 15.41	si	0.38	0.7234
	2.5 %	33.94 ± 11.06	85.05 ± 29.45	si	2.81	0.0481
Zn	5 %	10.55 ± 1.97	13.47 ± 2.48	si	1.6	0.185
	10 %	6.76 ± 5.22	26.54 ± 26.76	si	1.26	0.2772

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²), indican el número de réplicas. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXIII. Concentraciones de metales (mg/Kg) en tejido vegetal de *A. farnesiana* crecida en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.

Metal	Tratamientos				MNT		
	0 %	2.5 %	5 %	10 %	Roedores	Ganado	Ovejas
Al	147.90 ± 121.86	111.25 ± 32.92	90.26 ± 40.90	101.75 ± 10.78	200	1000	1000
Sb	BLD	BLD	BLD	BLD	70-150		
As	BLD	BLD	BLD	BLD	30	30	30
Ba	BLD	2.15 ± 1.66	BLD	0.49	250		
Be	BLD	BLD	BLD	BLD			
Cd	BLD	BLD	BLD	BLD	10	10	10
Cr	14.90 ± 15.95	3.41 ± 0.26	4.78 ± 0.95	5.52 ± 2.85	100	100	100
Co	BLD	BLD	BLD	BLD	25	25	25
Cu	21.89 ± 17.38	8.26 ± 0.83	6.67 ± 1.64	5.51 ± 1.23	500	40	15
Fe	293.97 ± 215.53	257.74 ± 112.51	142.78 ± 42.81	254.56 ± 172.94	500	500	500
Pb	0.93	0.61 ± 0.06	0.96 ± 1.02	0.549	10	100	100
Mn	4.21 ± 5.95	52.54 ± 15.06	19.22 ± 5.99	20.18 ± 8.24	2000	2000	2000
Mo	0.31 ± 0.54	1.10 ± 0.77	1.88 ± 0.69	2.67 ± 0.33	7	5	5
Ni	1.80 ± 1.52	1.20 ± 0.70	25.36 ± 42.3	0.87 ± 0.2	50	100	100
Se	5.32 ± 4.69	1.84 ± 0.38	2.26 ± 0.52	2.26 ± 0.52	5	5	5
Ag	2.98 ± 3.19	0.62 ± 0.05	0.85 ± 0.20	0.79 ± 0.3			
Sr	BLD	21.15 ± 10.95	8.75 ± 4.15	10.89 ± 7.3	1000	2000	2000
Tl	6.03 ± 4.73	1.82 ± 0.65	2.30 ± 0.79	2.88 ± 1.08			
V	BLD	BLD	BLD	BLD		50	50
Zn	20.65 ± 21.2	33.94 ± 11.06	10.55 ± 1.97	6.76 ± 5.22	500	500	300

Valores de MNTs basados en índices de salud animal (National Research Council, 2005). BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que rebasan el MNT para alguno de los diferentes animales referenciados.

Anexo XXXIV. Concentraciones de metales en tejido vegetal de *P. velutina* crecida en los diferentes tratamientos bajo condiciones controladas, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.

Metal	Tratamientos				MNT		
	0 %	2.50 %	5 %	10 %	Roedores	Ganado	Ovejas
Al	233.19 ± 81.47	221.72 ± 11.01	126.32 ± 16.2	91.47 ± 32.68	200	1000	1000
Sb	BLD	BLD	BLD	BLD	70-150		
As	BLD	BLD	BLD	BLD	30	30	30
Ba	BLD	1.07 ± 0.93	0.66 ± 0.93	1.94 ± 1.92	250		
Be	BLD	BLD	BLD	BLD			
Cd	BLD	BLD	BLD	BLD	10	10	10
Cr	18.01 ± 9.39	9.91 ± 1.36	4.36 ± 1.40	1.95 ± 1.05	100	100	100
Co	BLD	BLD	BLD	BLD	25	25	25
Cu	50.78 ± 16.07	29.84 ± 2.66	11.69 ± 1.52	17.49 ± 6.93	500	40	15
Fe	743.94 ± 314.74	451.96 ± 72.02	260.43 ± 54.7	195.8 ± 81.75	500	500	500
Pb	1.76 ± 0.97	1.15 ± 0.44	2.18 ± 2.45	0.24 ± 0.20	10	100	100
Mn	14.05 ± 8.99	178.17 ± 26.37	24.61 ± 3.70	37.86 ± 4.43	2000	2000	2000
Mo	1.76 ± 0.97	3.08 ± 0.94	6.84 ± 3.18	7.35 ± 3.64	7	5	5
Ni	2.19 ± 0.93	2.01 ± 0.35	1.38 ± 0.60	0.54 ± 0.34	50	100	100
Se	5.28 ± 2.90	3.51 ± 0.53	2.16 ± 0.37	1.28 ± 0.50	5	5	5
Ag	3.52 ± 1.94	1.75 ± 0.27	0.79 ± 0.25	0.37 ± 0.16			
Sr	BLD	10.19 ± 2.16	13.44 ± 6.11	31.07 ± 9.15	1000	2000	2000
Tl	7.57 ± 5.9	2.29 ± 0.21	1.85 ± 0.65	1.22 ± 0.67			
V	BLD	BLD	BLD	BLD		50	50
Zn	26.4 ± 15.41	85.05 ± 29.45	13.47 ± 2.48	26.54 ± 26.76	500	500	300

Valores de MNTs basados en índices de salud animal (National Research Council, 2005). BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que rebasan el MNT para alguno de los diferentes animales referenciados.

Anexo XXXV. Factor de acumulación de *A. farnesiana* bajo condiciones controladas. El factor de acumulación es el coeficiente del contenido de metales en tejidos aéreos de la planta y el contenido de metales en la rizósfera.

Metal	Tratamientos				
	0 %	2.5 %	5 %	10 %	Control positivo
Al	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
Sb	0.00 ± 0.00	BLD	BLD	BLD	0.00 ¹
As	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Ba	BLD	0.03 ± 0.02	0.00 ¹	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.00
Be	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Cd	BLD	0.00 ± 0.00	0.00 ¹	0.001 ¹	0.00 ± 0.00
Cr	5.83 ± 6.15	0.89 ± 0.15	1.10 ± 0.26	0.96 ± 0.51	0.35 ± 0.13
Co	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Cu	0.09 ± 0.08	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.11 ± 0.02
Fe	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.00
Pb	0.03 ¹	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.02	0.01 ¹	0.02 ¹
Mn	0.10 ± 0.14	0.86 ± 0.30	0.25 ± 0.10	0.20 ± 0.09	0.08 ± 0.02
Mo	0.00 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.00	BLD
Ni	2.64 ± 1.96	1.27 ± 0.58	0.62 ± 0.15	0.40 ± 0.15	0.65 ± 0.86
Se	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Ag	0.67 ± 0.70	0.12 ± 0.01	0.17 ± 0.04	0.16 ± 0.06	BLD
Sr	BLD	1.93 ± 1.07	0.53 ± 0.27	0.37 ± 0.26	0.11 ± 0.02
Tl	3.31 ± 2.56	1.11 ± 0.29	2.56 ± 1.37	6.44 ± 3.97	BLD
V	BLD	BLD	BLD	BLD	0.00 ¹
Zn	0.47 ± 0.45	0.72 ± 0.21	0.21 ± 0.05	0.12 ± 0.09	0.20 ± 0.04

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²), indican el número de réplicas. Valores en negritas representan que la especie se comportan como fitoextractoras de determinado metal.

Anexo XXXVI. Factor de acumulación de *P. velutina* bajo condiciones controladas. El factor de acumulación es el coeficiente del contenido de metales en tejidos aéreos de la planta y el contenido de metales en la rizósfera.

Metal	Tratamientos				
	0 %	2.5 %	5 %	10 %	Control positivo
Al	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Sb	BLD	BLD	BLD	BLD	0.00 ¹
As	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Ba	BLD	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.00
Be	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Cd	0.00 ¹	0.00 ¹	0.00 ¹	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Cr	6.71 ± 5.24	2.88 ± 0.27	1.01 ± 0.33	0.35 ± 0.19	0.16 ± 0.14
Co	BLD	BLD	BLD	0.00 ¹	0.12 ¹
Cu	0.25 ± 0.13	0.11 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.02	0.82 ± 0.50
Fe	0.14 ± 0.08	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
Pb	0.06 ± 0.04	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.05	0.01 ± 0.00	BLD
Mn	0.34 ± 0.14	2.98 ± 0.44	0.34 ± 0.03	0.39 ± 0.06	0.14 ± 0.01
Mo	0.03 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.10 ± 0.04	0.11 ± 0.05	BLD
Ni	2.83 ± 3.08	2.33 ± 1.03	1.04 ± 0.43	0.26 ± 0.17	0.23 ± 0.03
Se	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Ag	0.89 ± 0.53	0.38 ± 0.06	0.16 ± 0.05	0.07 ± 0.03	BLD
Sr	BLD	0.96 ± 0.21	0.79 ± 0.34	1.07 ± 0.28	0.14 ± 0.02
Tl	4.07 ± 2.97	1.74 ± 0.31	1.65 ± 0.61	2.55 ± 1.62	BLD
V	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD
Zn	0.66 ± 0.31	1.9 ± 0.63	0.28 ± 0.03	0.47 ± 0.47	0.66 ± 0.16

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (¹, ²), indican el número de réplicas. Valores en negritas representan que la especie se comportan como fitoextractoras de determinado metal (por arriba de 1).

Anexo XXXVII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *A. farnesiana*, bajo condiciones de campo.

Metal	Tratamientos		Normalidad	Transfor- mación	Prueba estadística	
	10 %	20 %			t	valor p
Ag	0.083 ± 0.028	0.126 ± 0.020	si		2.13	0.0999
Al	742.333 ± 346.763	757.333 ± 174.242	si		0.07	0.9498
As	0.800 ± 0.159	0.897 ± 0.119	si		0.84	0.4466
Au	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.000 ²	si			
B	1.567 ± 0.723	2.333 ± 0.321	si		1.68	0.1688
Ba	6.057 ± 2.834	6.463 ± 0.941	si		0.23	0.8251
Be	0.014 ± 0.003	0.014 ± 0.004	si		0.22	0.834
Bi	0.046 ± 0.02	0.041 ± 0.008	si		-0.38	0.7255
Br	BLD	BLD				
Ca	170.000 ± 26.458	313.333 ± 15.275	si		8.13	0.0012
Cd	0.003 ± 0.002	0.007 ± 0.001	si		2.75	0.0514
Ce	0.488 ± 0.148	0.616 ± 0.102	si		1.24	0.2829
Co	0.021 ± 0.008	0.047 ± 0.016	si		2.46	0.0698
Cr	0.097 ± 0.031	0.133 ± 0.032	si		1.43	0.2254
Cs	0.161 ± 0.073	0.164 ± 0.029	si		0.08	0.9425
Cu	5.820 ± 1.785	13.567 ± 2.635	si		4.22	0.0135
Dy	0.020 ± 0.007	0.029 ± 0.009	si		1.30	0.2632
Er	0.015 ± 0.005	0.017 ± 0.003	si		0.42	0.6988
Eu	0.007 ± 0.001	0.007 ± 0.003	si		0.45	0.6746
Fe	392.333 ± 140.792	496.667 ± 106.039	si		1.02	0.3632
Ga	0.223 ± 0.102	0.243 ± 0.042	si		0.31	0.7692
Gd	0.024 ± 0.008	0.032 ± 0.008	si		1.23	0.2867
Ge	0.020 ± 0.010	0.023 ± 0.002	si		0.39	0.7155
Hf	0.048 ± 0.0170	0.047 ± 0.012	si		0.00	0.9556
Hg	0.010	BLD				
Ho	0.006 ± 0.002	0.006 ± 0.001	si		0.35	0.7454
I	0.050	BLD				
In	0.020 ± 0.007	0.025 ± 0.003	si		1.11	0.3297
K	792.667 ± 205.559	1066.667 ± 80.829	si		2.15	0.0981
La	0.303 ± 0.050	0.363 ± 0.105	si		0.90	0.4208
Li	1.517 ± 0.575	0.947 ± 0.163	si		-1.65	0.1738
Lu	0.004 ± 0.001	0.005 ± 0.001	si		0.63	0.5632
Mg	67.667 ± 17.673	101.4 ± 19.65	si		2.21	0.0915
Mn	2.353 ± 0.866	3.590 ± 0.919	no	log	1.80	0.1467
Mo	3.987 ± 0.682	5.343 ± 0.483	si		2.81	0.0483
Na	61.000 ± 6.083	123.667 ± 25.325	si		4.17	0.0141
Nb	0.047 ± 0.014	0.045 ± 0.008	si		-0.23	0.8270
Nd	0.163 ± 0.053	0.237 ± 0.049	si		1.77	0.1512
Ni	BLD	0.073 ± 0.015				
P	36.333 ± 3.215	64.667 ± 13.614	si		3.51	0.0247
Pb	0.730 ± 0.291	0.653 ± 0.141	si		-0.41	0.6998
Pr	0.055 ± 0.016	0.059 ± 0.011	no	inversa	-0.53	0.6250

Rb	2.903 ± 1.282	2.830 ± 0.262	si		-0.10	0.9274
Re	BLD	0.001 ± 0.001				
Sb	0.777 ± 0.303	0.773 ± 0.066	si		-0.02	0.9832
Se	0.060	0.060 ± 0.026				
Sm	0.035 ± 0.014	0.040 ± 0.006	si		0.05	0.6674
Sn	0.149 ± 0.08	0.141 ± 0.017	si		-0.15	0.8843
Sr	1.777 ± 0.116	2.923 ± 0.352	si		5.36	0.0059
Ta	0.003 ± 0.002	0.004 ± 0.001	si		0.80	0.4676
Tb	0.004 ± 0.001	0.005 ± 0.002	si		1.00	0.3753
Te	0.021 ± 0.013	0.027 ± 0.007	si		0.72	0.5107
Th	0.169 ± 0.075	0.162 ± 0.028	si		-0.15	0.8845
Ti	9.017 ± 2.932	12.267 ± 3.062	no	inversa	-1.53	0.1992
Tl	0.025 ± 0.013	0.022 ± 0.001	si		-0.50	0.6456
Tm	0.003 ± 0.001	0.003 ± 0.000	si		0.54	0.6149
U	0.084 ± 0.035	0.122 ± 0.020	si		1.65	0.1739
V	0.600 ± 0.254	0.880 ± 0.252	no	log	1.49	0.2111
W	2.200 ± 0.599	2.513 ± 0.118	si		0.89	0.4243
Y	0.165 ± 0.037	0.195 ± 0.035	si		1.02	0.3643
Yb	0.018 ± 0.005	0.027 ± 0.010	si		1.31	0.2613
Zn	1.340 ± 0.575	1.973 ± 0.426	si		1.53	0.1998
Zr	1.590 ± 0.528	1.198 ± 0.266	si		-1.15	0.3148

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXVIII. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *P. velutina*, bajo condiciones de campo.

Metal	Tratamientos		Norma- lidad	Transfor- mación	Prueba estadística	
	10 %	20 %			t/ χ^2 *	valor p
Ag	0.072 ± 0.002	0.144 ± 0.044	si		2.82	0.0480
Al	747.000 ± 57.035	754.000 ± 73.185	si		0.13	0.9023
As	0.870 ± 0.017	0.897 ± 0.023	no		1.26*	0.2612
Au	0.001 ± 0.000 ²	0.001 ± 0.000				
B	5.267 ± 0.751	2.700 ± 0.436	si		-5.12	0.0069
Ba	6.173 ± 0.339	6.453 ± 0.744	si		0.59	0.5851
Be	0.018 ± 0.002	0.015 ± 0.003	si		-1.64	0.1757
Bi	0.035 ± 0.004	0.041 ± 0.003	si		2.37	0.0765
Br	BLD	BLD				
Ca	186.667 ± 30.551	306.667 ± 23.094	si		5.43	0.0056
Cd	0.001 ± 0.001	0.006 ± 0.001	si		9.19	0.0008
Ce	0.500 ± 0.093	0.596 ± 0.030	si		1.71	0.1620
Co	0.023 ± 0.009	0.045 ± 0.004	si		3.72	0.0205
Cr	0.097 ± 0.038	0.150 ± 0.030	si		1.91	0.1284
Cs	0.178 ± 0.036	0.162 ± 0.011	si		-0.78	0.4815

Cu	4.783 ± 0.419	12.850 ± 0.522	si	20.88	<0.0001	
Dy	0.019 ± 0.003	0.026 ± 0.001	si	3.52	0.0245	
Er	0.014 ± 0.001	0.019 ± 0.002	si	3.72	0.0204	
Eu	0.005 ± 0.000	0.008 ± 0.001	si	6.68	0.0026	
Fe	304.333 ± 16.503	464.333 ± 13.868	si	12.86	0.0002	
Ga	0.223 ± 0.006	0.257 ± 0.015	si	3.54	0.0241	
Gd	0.020 ± 0.002	0.031 ± 0.000	si	8.48	0.0011	
Ge	0.022 ± 0.001	0.020 ± 0.005	si	-0.73	0.5072	
Hf	0.042 ± 0.004	0.048 ± 0.012	si	0.63	0.4727	
Hg	BLD	BLD				
Ho	0.004 ± 0.000	0.006 ± 0.001	si	2.62	0.0591	
I	0.077 ± 0.012	0.050				
In	0.016 ± 0.002	0.023 ± 0.001	si	5.61	0.0050	
K	1009.333 ± 103.568	1196.667 ± 23.094	si	3.06	0.0377	
La	0.253 ± 0.015	0.344 ± 0.046	si	3.26	0.0310	
Li	4.387 ± 1.297	0.960 ± 0.121	si	-4.56	0.0104	
Lu	0.003 ± 0.001	0.003 ± 0.001	si	0.00	1.0000	
Mg	79.233 ± 21.164	105.167 ± 4.041	si	2.08	0.1055	
Mn	2.247 ± 0.140	3.410 ± 0.254	si	6.96	0.0022	
Mo	3.977 ± 0.197	5.457 ± 0.622	si	3.93	0.0171	
Na	84.000 ± 10.817	168.000 ± 16.000	si	7.53	0.0017	
Nb	0.047 ± 0.009	0.047 ± 0.004	si	0.09	0.9314	
Nd	0.160 ± 0.011	0.198 ± 0.012	si	3.94	0.0169	
Ni	0.050	0.073 ± 0.012				
P	46.000 ± 12.124	68.333 ± 12.014	si	2.27	0.0861	
Pb	0.530 ± 0.120	0.611 ± 0.024	si	1.15	0.3141	
Pr	0.051 ± 0.011	0.060 ± 0.005	si	1.27	0.2726	
Rb	3.413 ± 0.136	3.007 ± 0.313	si	-2.07	0.1078	
Re	BLD	0.001				
Sb	0.660 ± 0.080	0.741 ± 0.038	si	1.59	0.1878	
Se	BLD	0.050 ± 0.036				
Sm	0.025 ± 0.001	0.039 ± 0.003	si	7.87	0.0014	
Sn	0.134 ± 0.017	0.140 ± 0.012	si	0.55	0.6131	
Sr	1.965 ± 0.196	2.920 ± 0.241	si	5.33	0.0060	
Ta	0.003 ± 0.000	0.003 ± 0.001	si	1.00	0.3739	
Tb	0.003 ± 0.000	0.004 ± 0.000	si	5.59	0.0050	
Te	0.016 ± 0.005	0.023 ± 0.002	si	2.00	0.1161	
Th	0.142 ± 0.014	0.181 ± 0.013	si	3.39	0.0275	
Ti	11.067 ± 1.241	13.200 ± 1.431	si	1.95	0.1229	
Tl	0.026 ± 0.002	0.021 ± 0.003	si	-2.17	0.0963	
Tm	0.002 ± 0.000	0.003 ± 0.000	si	0.86	0.4370	
U	0.080 ± 0.010	0.111 ± 0.002	si	5.40	0.0057	
V	0.673 ± 0.101	0.927 ± 0.083	no	log	3.31	0.0297
W	2.217 ± 0.055	2.633 ± 0.178	si	3.88	0.0179	
Y	0.125 ± 0.023	0.162 ± 0.003	si	2.83	0.0473	
Yb	0.016 ± 0.002	0.021 ± 0.001	si	3.12	0.0354	

Zn	1.140 ± 0.046	1.837 ± 0.117	si	9.59	0.0007
Zr	1.490 ± 0.044	1.182 ± 0.107	si	-4.63	0.0098

BLD= Bajo el límite de detección. Subíndices (1, 2), indican el número de réplicas. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXIX. Concentración de metales (mg/Kg) en tratamientos sin siembra bajo condiciones de campo.

Metal	Tratamientos			Norma- lidad	Transfor- mación	Prueba estadística	
	0 %	10 %	20 %			F/t* χ ² **	valor p
Ag	0.091 ± 0.013 b	0.074 ± 0.014 b	0.162 ± 0.007 a	si		46.95	0.0002
Al	924.333 ± 256.971	809.667 ± 8.963	846.333 ± 86.57	si		0.42	0.6754
As	0.513 ± 0.164 b	0.890 ± 0.078 a	0.990 ± 0.075 a	si		14.64	0.0049
Au	BLD	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.000	si		-2.00*	0.1161
B	3.267 ± 1.343	1.667 ± 0.231	2.967 ± 0.321	si		3.32	0.1069
Ba	6.880 ± 1.608	7.753 ± 0.205	7.377 ± 0.868	si		0.51	0.6239
Be	0.024 ± 0.011	0.015 ± 0.003	0.018 ± 0.003	si		1.35	0.329
Bi	0.041 ± 0.010	0.042 ± 0.009	0.047 ± 0.004	si		0.15	0.6139
Br	BLD	BLD	BLD				
Ca	33.333 ± 5.774 c	233.333 ± 23.094 b	316.667 ± 40.415 a	si		86.74	<0.0001
Cd	0.003 ± 0.001 ²	0.003 ± 0.001	0.009 ± 0.004	si		2.59*	0.0605
Ce	0.564 ± 0.194	0.567 ± 0.096	0.753 ± 0.030	si		2.21	0.1913
Co	0.021 ± 0.009 b	0.027 ± 0.003 b	0.056 ± 0.008 a	si		18.23	0.0028
Cr	0.130	0.110 ± 0.010	0.163 ± 0.012	si		6.05*	0.0038
Cs	0.264 ± 0.137	0.154 ± 0.009	0.189 ± 0.025	si		1.47	0.3029
Cu	7.190 ± 0.759 b	7.247 ± 2.364 b	15.55 ± 2.079 a	si		19.86	0.0023
Dy	0.022 ± 0.003	0.028 ± 0.006	0.032 ± 0.001	si		5.01	0.0526
Er	0.014 ± 0.002 b	0.016 ± 0.003 ab	0.021 ± 0.002 a	si		5.41	0.0454
Eu	0.005 ± 0.001 b	0.006 ± 0.000 b	0.009 ± 0.001 a	si		12.24	0.0076
Fe	379.667 ± 104.006 ab	365.000 ± 16.462 b	562.333 ± 78.501 a	si		6.31	0.0335
Ga	0.243 ± 0.078	0.263 ± 0.021	0.280 ± 0.020	si		0.44	0.6623
Gd	0.022 ± 0.003 b	0.030 ± 0.008 ab	0.036 ± 0.002 a	si		7.20	0.0255
Ge	0.026 ± 0.010	0.025 ± 0.001	0.024 ± 0.004	si		0.06	0.9409
Hf	0.047 ± 0.012	0.046 ± 0.004	0.051 ± 0.001	si		0.41	0.6819
Hg	BLD	BLD	0.010				
Ho	0.005 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.007 ± 0.001	si		3.06	0.1212
I	0.060 ± 0.017	BLD	BLD				
In	0.023 ± 0.005	0.021 ± 0.001	0.028 ± 0.003	si		3.77	0.0869
K	901.667 ± 238.022	1103.333 ± 70.238	1173.333 ± 63.509	si		2.73	0.1436
La	0.315 ± 0.108	0.273 ± 0.028	0.377 ± 0.071	si		1.42	0.3136
Li	4.190 ± 3.477 b	1.377 ± 0.110 a	1.083 ± 0.051 a	no	inversa	17.46	0.0032
Lu	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.004 ± 0.000	si		1.87	0.2341
Mg	81.833 ± 45.385	79.367 ± 0.902	115.4 ± 14.722	si		1.60	0.2772

Mn	2.590 ± 0.871	2.840 ± 0.197	3.997 ± 0.513	si		4.78	0.0574
Mo	4.270 ± 1.172	3.957 ± 0.567	5.787 ± 0.539	si		4.34	0.0683
Na	80.667 ± 3.055 b	87.667 ± 11.372 b	158.000 ± 5.568 a	si		97.04	<0.0001
Nb	0.054 ± 0.036	0.052 ± 0.003	0.054 ± 0.009	si		0.02	0.9852
Nd	0.194 ± 0.028 b	0.194 ± 0.021 b	0.259 ± 0.032 a	si		5.68	0.0413
Ni	0.050	BLD	0.090 ± 0.010				
P	7.333 ± 2.517 c	50.000 ± 9.849 b	75.000 ± 5.292 a	si		80.23	<0.0001
Pb	0.414 ± 0.121 b	0.759 ± 0.075 a	0.796 ± 0.099 a	no	log	12.76	0.0069
Pr	0.049 ± 0.014 b	0.056 ± 0.005 ab	0.075 ± 0.009 a	si		5.57	0.0429
Rb	3.893 ± 1.383	3.860 ± 0.236	3.117 ± 0.210	si		0.86	0.4688
Re	BLD	0.000	0.000 ± 0.000				
Sb	0.662 ± 0.166	0.800 ± 0.044	0.810 ± 0.068	si		1.78	0.2473
Se	BLD	0.025 ± 0.007	0.030 ± 0.010				
Sm	0.025 ± 0.005 b	0.031 ± 0.006 ab	0.045 ± 0.006 a	si		9.89	0.0126
Sn	0.173 ± 0.051	0.160 ± 0.004	0.203 ± 0.069	si		0.59	0.5849
Sr	0.887 ± 0.173 c	2.367 ± 0.188 b	3.153 ± 0.387 a	si		55.31	0.0001
Ta	0.003 ± 0.002	0.003 ± 0.000	0.005 ± 0.001	si		1.05	0.4064
Tb	0.003 ± 0.000 b	0.004 ± 0.001 b	0.006 ± 0.000 a	si		16.74	0.0035
Te	0.015 ± 0.008 b	0.022 ± 0.004 ab	0.034 ± 0.001 a	si		10.93	0.0100
Th	0.143 ± 0.035	0.166 ± 0.010	0.185 ± 0.002	si		3.08	0.1204
Ti	12.577 ± 5.781	11.35 ± 0.458	13.833 ± 1.200	si		0.40	0.6896
Tl	0.032 ± 0.009	0.028 ± 0.002	0.025 ± 0.003	si		1.37	0.3241
Tm	0.003 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.000	no	log	0.78	0.4811
U	0.163 ± 0.133	0.079 ± 0.006	0.137 ± 0.021	si		0.92	0.4496
V	0.710 ± 0.295	0.747 ± 0.085	1.007 ± 0.071	si		2.36	0.1749
W	1.480 ± 0.665 b	2.343 ± 0.076 ab	2.840 ± 0.260 a	si		8.27	0.0189
Y	0.149 ± 0.023 b	0.178 ± 0.003 ab	0.209 ± 0.002 a	no		7.20**	0.0300
Yb	0.018 ± 0.005	0.022 ± 0.001	0.024 ± 0.002	si		2.29	0.1824
Zn	1.353 ± 0.366 b	1.597 ± 0.206 ab	2.220 ± 0.280 a	si		7.07	0.0265
Zr	1.575 ± 0.319	1.363 ± 0.065	1.673 ± 0.106	si		1.92	0.2262

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXX. Concentración de metales (mg/Kg) en rizósfera de *A. farnesiana* y *P. velutina*, y tratamientos sin siembra bajo condiciones de campo.

Metal	Trata- miento	Especies			Norma- lidad	Trans- forma- ción	Prueba estadística	
		<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>	Sin siembra			F X ^{2**}	valor p
Ag	10 %	0.083 ± 0.028	0.072 ± 0.002	0.074 ± 0.014	si	0.30	0.7491	
	20 %	0.126 ± 0.02	0.144 ± 0.044	0.162 ± 0.007	si	1.20	0.3640	
Al	10 %	742.333 ± 346.763	747.000 ± 57.035	809.667 ± 8.963	si	0.10	0.9037	
	20 %	757.333 ± 174.242	754.000 ± 73.185	846.333 ± 86.570	si	0.57	0.5928	
As	10 %	0.800 ± 0.159	0.870 ± 0.017	0.890 ± 0.078	si	0.64	0.5616	

Au	20 %	0.897 ± 0.119	0.897 ± 0.023	0.990 ± 0.075	si	1.28	0.3451
	10 %	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.000	0.002 ± 0.001			
B	20 %	0.001 ± 0.000	0.001 ± 0.000	0.001 ± 0.000			
	10 %	1.567 ± 0.723 b	5.267 ± 0.751 a	1.667 ± 0.231 b	si	35.08	0.0005
Ba	20 %	2.333 ± 0.321	2.700 ± 0.436	2.967 ± 0.321	si	2.29	0.1820
	10 %	6.057 ± 2.834	6.173 ± 0.339	7.753 ± 0.205	si	0.99	0.4260
Be	20 %	6.463 ± 0.941	6.453 ± 0.744	7.377 ± 0.868	si	1.15	0.3768
	10 %	0.014 ± 0.003	0.018 ± 0.002	0.015 ± 0.003	si	2.04	0.2104
Bi	20 %	0.014 ± 0.004	0.015 ± 0.003	0.018 ± 0.003	si	1.35	0.3285
	10 %	0.046 ± 0.020	0.035 ± 0.004	0.042 ± 0.009	si	0.60	0.5774
Br	20 %	0.041 ± 0.008	0.041 ± 0.003	0.047 ± 0.004	si	1.17	0.3736
	10 %	BLD	BLD	BLD			
Ca	20 %	BLD	BLD	BLD			
	10 %	170.000 ± 26.458	186.667 ± 30.551	233.333 ± 23.094	si	4.48	0.0646
Cd	20 %	313.333 ± 15.275	306.667 ± 23.094	316.667 ± 40.415	si	0.10	0.9088
	10 %	0.003 ± 0.002	0.001 ± 0.001	0.003 ± 0.001	si	2.00	0.2160
Ce	20 %	0.007 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.009 ± 0.004	si	1.77	0.2492
	10 %	0.488 ± 0.148	0.500 ± 0.093	0.567 ± 0.096	si	0.42	0.6779
Co	20 %	0.616 ± 0.102 b	0.596 ± 0.030 b	0.753 ± 0.030 a	si	5.35	0.0464
	10 %	0.021 ± 0.008	0.023 ± 0.009	0.027 ± 0.003	si	0.55	0.6040
Cr	20 %	0.047 ± 0.016	0.045 ± 0.004	0.056 ± 0.008	si	0.91	0.4530
	10 %	0.097 ± 0.031	0.097 ± 0.038	0.110 ± 0.010	si	0.22	0.8116
Cs	20 %	0.133 ± 0.032	0.150 ± 0.030	0.163 ± 0.012	si	0.98	0.4270
	10 %	0.161 ± 0.073	0.178 ± 0.036	0.154 ± 0.009	si	0.22	0.8115
Cu	20 %	0.164 ± 0.029	0.162 ± 0.011	0.189 ± 0.025	si	1.29	0.3408
	10 %	5.820 ± 1.785	4.783 ± 0.419	7.247 ± 2.364	si	1.54	0.2888
Dy	20 %	13.567 ± 2.635	12.850 ± 0.522	15.550 ± 2.079	si	1.53	0.2912
	10 %	0.020 ± 0.007	0.019 ± 0.003	0.028 ± 0.006	si	2.22	0.1897
Er	20 %	0.029 ± 0.009	0.026 ± 0.001	0.032 ± 0.001	si	0.97	0.4304
	10 %	0.015 ± 0.005	0.014 ± 0.001	0.016 ± 0.003	si	0.47	0.6437
Eu	20 %	0.017 ± 0.003	0.019 ± 0.002	0.021 ± 0.002	si	1.79	0.2450
	10 %	0.007 ± 0.001	0.005 ± 0.000	0.006 ± 0.000	si	3.67	0.0910
Fe	20 %	0.007 ± 0.003	0.008 ± 0.001	0.009 ± 0.001	si	0.57	0.5930
	10 %	392.333 ± 140.792	304.333 ± 16.503	365.000 ± 16.462	si	0.90	0.4564
Ga	20 %	496.667 ± 106.039	464.333 ± 13.868	562.333 ± 78.501	si	1.28	0.3455
	10 %	0.223 ± 0.102	0.223 ± 0.006	0.263 ± 0.021	si	0.44	0.6631
Gd	20 %	0.243 ± 0.042	0.257 ± 0.015	0.280 ± 0.020	si	1.31	0.3373
	10 %	0.024 ± 0.008	0.020 ± 0.002	0.030 ± 0.008	si	1.63	0.2726
Ge	20 %	0.032 ± 0.008	0.031 ± 0.000	0.036 ± 0.002	si	1.01	0.4195
	10 %	0.020 ± 0.010	0.022 ± 0.001	0.025 ± 0.001	no	2.44**	0.2951
Hf	20 %	0.023 ± 0.002	0.020 ± 0.005	0.024 ± 0.004	si	0.73	0.5217
	10 %	0.048 ± 0.017	0.042 ± 0.004	0.046 ± 0.004	si	0.27	0.7731
Hg	20 %	0.047 ± 0.012	0.048 ± 0.012	0.051 ± 0.001	si	0.13	0.8780
	10 %	0.010	BLD	BLD			
Ho	20 %	BLD	BLD	0.010			
	10 %	0.006 ± 0.002	0.004 ± 0.000	0.006 ± 0.001	si	1.89	0.2309

I	20 %	0.006 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.007 ± 0.001	si	0.65	0.5530
	10 %	0.050	0.077 ± 0.012	BLD	si		
	20 %	BLD	0.050	BLD			
In	10 %	0.020 ± 0.007	0.016 ± 0.002	0.021 ± 0.001	si	0.91	0.4506
	20 %	0.025 ± 0.003	0.023 ± 0.001	0.028 ± 0.003	si	1.90	0.2299
K	10 %	792.667 ± 205.559	1009.333 ± 103.568	1103.333 ± 70.238	si	3.94	0.0806
	20 %	1066.667 ± 80.829	1196.667 ± 23.094	1173.333 ± 63.509	si	3.89	0.0824
La	10 %	0.303 ± 0.050	0.253 ± 0.015	0.273 ± 0.028	si	1.58	0.2810
	20 %	0.363 ± 0.105	0.344 ± 0.046	0.377 ± 0.071	si	0.14	0.8750
Li	10 %	1.517 ± 0.575 b	4.387 ± 1.297 a	1.377 ± 0.110 b	si	12.82	0.0068
	20 %	0.947 ± 0.163	0.960 ± 0.121	1.083 ± 0.051	si	1.17	0.3730
Lu	10 %	0.004 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.001	si	0.25	0.7901
	20 %	0.005 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.004 ± 0.000	si	1.47	0.3028
Mg	10 %	67.667 ± 17.673	79.233 ± 21.164	79.367 ± 0.902	si	0.53	0.6120
	20 %	101.400 ± 19.650	105.167 ± 4.041	115.400 ± 14.722	si	0.76	0.5068
Mn	10 %	2.353 ± 0.866	2.247 ± 0.140	2.840 ± 0.197	si	1.11	0.3877
	20 %	3.590 ± 0.919	3.410 ± 0.254	3.997 ± 0.513	si	0.69	0.5359
Mo	10 %	3.987 ± 0.682	3.977 ± 0.197	3.957 ± 0.567	si	0.00	0.9975
	20 %	5.343 ± 0.483	5.457 ± 0.622	5.787 ± 0.539	si	0.52	0.6170
Na	10 %	61.000 ± 6.083 b	84.000 ± 10.817 ab	87.667 ± 11.372 a	si	6.64	0.0302
	20 %	123.667 ± 25.325 b	168.000 ± 16.000 a	158.000 ± 5.568 ab	si	5.24	0.0482
Nb	10 %	0.047 ± 0.014	0.047 ± 0.009	0.052 ± 0.003	si	0.22	0.8054
	20 %	0.045 ± 0.008	0.047 ± 0.004	0.054 ± 0.009	si	1.14	0.3802
Nd	10 %	0.163 ± 0.053	0.160 ± 0.011	0.194 ± 0.021	si	0.94	0.4419
	20 %	0.237 ± 0.049	0.198 ± 0.012	0.259 ± 0.032	si	2.45	0.1670
Ni	10 %	BLD	0.050	BLD			
	20 %	0.073 ± 0.015	0.073 ± 0.012	0.090 ± 0.010	si	1.79	0.2463
P	10 %	36.333 ± 3.215	46.000 ± 12.124	50.000 ± 9.849	si	1.75	0.2524
	20 %	64.667 ± 13.614	68.333 ± 12.014	75.000 ± 5.292	si	0.69	0.5371
Pb	10 %	0.730 ± 0.291	0.530 ± 0.120	0.759 ± 0.075	si	1.34	0.3311
	20 %	0.653 ± 0.141	0.611 ± 0.024	0.796 ± 0.099	si	2.80	0.1386
Pr	10 %	0.055 ± 0.016	0.051 ± 0.011	0.056 ± 0.005	si	0.20	0.8235
	20 %	0.059 ± 0.011	0.060 ± 0.005	0.075 ± 0.009	si	3.47	0.0998
Rb	10 %	2.903 ± 1.282	3.413 ± 0.136	3.860 ± 0.236	si	1.20	0.3645
	20 %	2.830 ± 0.262	3.007 ± 0.313	3.117 ± 0.210	si	0.89	0.4571
Re	10 %	BLD	BLD	0.000			
	20 %	0.001 ± 0.001	0.000	0.000	si	0.57	0.6382
Sb	10 %	0.777 ± 0.303	0.660 ± 0.080	0.800 ± 0.044	si	0.51	0.6259
	20 %	0.773 ± 0.066	0.741 ± 0.038	0.810 ± 0.068	si	1.00	0.4221
Se	10 %	0.060	BLD	0.025 ± 0.007	si		
	20 %	0.060 ± 0.026	0.050 ± 0.036	0.030 ± 0.010		1.00	0.4219
Sm	10 %	0.035 ± 0.014	0.025 ± 0.001	0.031 ± 0.006	si	1.12	0.3871
	20 %	0.040 ± 0.006	0.039 ± 0.003	0.045 ± 0.006	si	1.22	0.3581
Sn	10 %	0.149 ± 0.080	0.134 ± 0.017	0.160 ± 0.004	si	0.24	0.7946

Sr	20 %	0.141 ± 0.017	0.140 ± 0.012	0.203 ± 0.069	si		2.25	0.1863
	10 %	1.777 ± 0.116 b	1.965 ± 0.196 ab	2.367 ± 0.188 a	si		9.39	0.0142
Ta	20 %	2.923 ± 0.352	2.920 ± 0.241	3.153 ± 0.387	si		0.48	0.6379
	10 %	0.003 ± 0.002	0.003 ± 0.000	0.003 ± 0.000	no		0.85**	0.6547
Tb	20 %	0.004 ± 0.001	0.003 ± 0.001	0.005 ± 0.001	si		2.17	0.1958
	10 %	0.004 ± 0.001	0.003 ± 0.000	0.004 ± 0.001	si		1.19	0.3671
Te	20 %	0.005 ± 0.002	0.004 ± 0.000	0.006 ± 0.000	si		1.49	0.2976
	10 %	0.021 ± 0.013	0.016 ± 0.005	0.022 ± 0.004	si		0.43	0.6667
Th	20 %	0.027 ± 0.007 ab	0.023 ± 0.002 b	0.034 ± 0.001 a	si		5.72	0.0408
	10 %	0.169 ± 0.075	0.142 ± 0.014	0.166 ± 0.010	si		0.32	0.7378
Ti	20 %	0.162 ± 0.028	0.181 ± 0.013	0.185 ± 0.002	si		1.43	0.3106
	10 %	9.017 ± 2.932	11.067 ± 1.241	11.350 ± 0.458	si		1.41	0.3148
Tl	20 %	12.267 ± 3.062	13.200 ± 1.431	13.833 ± 1.200	si		0.43	0.6664
	10 %	0.025 ± 0.013	0.026 ± 0.002	0.028 ± 0.002	si		0.08	0.9279
Tm	20 %	0.022 ± 0.001	0.021 ± 0.003	0.025 ± 0.003	si		1.85	0.2366
	10 %	0.003 ± 0.001	0.002 ± 0.000	0.003 ± 0.001	si		0.90	0.4567
U	20 %	0.003 ± 0.000 ab	0.003 ± 0.000 b	0.004 ± 0.000 a	si		6.43	0.0322
	10 %	0.084 ± 0.035	0.08 ± 0.010	0.079 ± 0.006	si		0.04	0.9570
V	20 %	0.122 ± 0.020	0.111 ± 0.002	0.137 ± 0.021	si		1.79	0.2452
	10 %	0.600 ± 0.254	0.673 ± 0.101	0.747 ± 0.085	si		0.59	0.5826
W	20 %	0.880 ± 0.252	0.927 ± 0.083	1.007 ± 0.071	si		0.49	0.6362
	10 %	2.200 ± 0.599	2.217 ± 0.055	2.343 ± 0.076	si		0.15	0.8635
Y	20 %	2.513 ± 0.118	2.633 ± 0.178	2.840 ± 0.260	si		2.17	0.1952
	10 %	0.165 ± 0.037	0.125 ± 0.023	0.178 ± 0.003	si		3.67	0.0912
Yb	20 %	0.195 ± 0.035	0.162 ± 0.003	0.209 ± 0.002	no	inversa	4.27	0.0704
	10 %	0.018 ± 0.005	0.016 ± 0.002	0.022 ± 0.001	si		2.54	0.1592
Zn	20 %	0.027 ± 0.010	0.021 ± 0.001	0.024 ± 0.002	si		0.76	0.5097
	10 %	1.340 ± 0.575	1.140 ± 0.046	1.597 ± 0.206	si		1.26	0.3495
Zr	20 %	1.973 ± 0.426	1.837 ± 0.117	2.220 ± 0.280	si		1.24	0.3536
	10 %	1.590 ± 0.528	1.490 ± 0.044	1.363 ± 0.065	no	inversa	0.18	0.8392
	20 %	1.198 ± 0.266 b	1.182 ± 0.107 b	1.673 ± 0.106 a	si		7.52	0.0232

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que se encontró una diferencia estadísticamente significativa.

Anexo XXXXI. Concentraciones de metales (mg/Kg) en tejido vegetal de especies crecidas en los distintos tratamientos en condiciones de campo y plantas de los parches de vegetación, comparadas con los máximos niveles tolerables (MNT) de metales en el alimento de animales.

Metal	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>		<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>	MNT		
	10 %	10 %	20 %	Parche de vegetación	Parche de vegetación	Roedores	Ganado	Ovejas
Au	0.0002	0.0006 ± 0.0002	0.0028 ± 0.0002	0.0010 ± 0.0001	0.0011 ± 0.0002			
Ag	0.0240	0.1095 ± 0.0219	0.1635 ± 0.0361	0.0987 ± 0.0197	0.5380 ± 0.2453			
Al	<100.000	100.0000 ± 0.0000	150.0000 ± 70.7107	100.0000 ± 0.0000	100.0000 ± 0.0000	200	1000	1000
As	0.0600	0.2700 ± 0.0000	0.3750 ± 0.0919	0.6767 ± 0.1779	0.7333 ± 0.0551	30	30	30
B	6.0000	47.0000 ± 4.2426	49.5000 ± 6.3640	60.6667 ± 13.5769	117.6667 ± 21.0792	150	150	150
Ba	1.1000	4.5500 ± 1.0607	3.8000 ± 0.8485	5.4667 ± 0.4509	2.2000 ± 0.1732	250		
Be	BLD	BLD	BLD	0.0100 ± 0.0000	BLD			
Bi	0.0050	0.0245 ± 0.0078	0.0405 ± 0.0177	0.0393 ± 0.0110	0.0600 ± 0.0113	500		
Ca	1300.0000	8100.0000 ± 1131.3708	9350.0000 ± 636.3961	10900.0000 ± 3124.0999	13733.3333 ± 1625.8331	20000	15000	15000
Cd	0.0090	0.0205 ± 0.0035	0.0505 ± 0.0134	0.0377 ± 0.0121	0.1647 ± 0.0593	10	10	10
Ce	0.1170	0.4435 ± 0.1563	0.5115 ± 0.1464	1.0770 ± 0.2763	0.9577 ± 0.3921			
Co	0.0220	0.0840 ± 0.0099	0.1010 ± 0.0410	0.1123 ± 0.0595	0.0933 ± 0.0476	25	25	25
Cr	0.1000	0.2550 ± 0.0212	0.5250 ± 0.1485	0.4833 ± 0.2113	0.4000 ± 0.0173	100	100	100
Cs	0.0280	0.1075 ± 0.0035	0.1960 ± 0.1329	2.4350 ± 0.6044	3.7317 ± 2.4365			
Cu	2.3600	27.3000 ± 6.5054	33.850 ± 5.8690	52.3667 ± 9.1511	72.6667 ± 37.1217	500	40	15
Fe	56.0000	211.0000 ± 41.0122	335.0000 ± 77.7817	169.3333 ± 34.0783	350.0000 ± 43.5890	500	500	500
Ga	0.0060	0.0280 ± 0.0071	0.0400 ± 0.0099	0.0150 ± 0.0060	0.0260 ± 0.0040			
Ge	BLD	0.0055 ± 0.0007	0.0065 ± 0.0021	0.0057 ± 0.0012	0.0090 ± 0.0010	30		
Hf	0.0050	0.0040 ± 0.0000	0.0060 ± 0.0014	0.0180	0.0020			
Hg	0.0010	0.0120 ± 0.0071	0.0155 ± 0.0049	0.0293 ± 0.0012	0.0417 ± 0.0055	1	2	2
In	BLD	0.0090 ± 0.0042	0.0130 ± 0.0014	0.0087 ± 0.0029	0.0240 ± 0.0030			
K	1600.0000	8900.0000 ± 1131.3708	13750.0000 ± 1767.7670	9433.3333 ± 2396.5253	9300.0000 ± 2535.7445	10000	20000	20000

La	0.0640	0.2590 ± 0.0877	0.3000 ± 0.0962	0.5823 ± 0.1577	0.6237 ± 0.2438			
Li	0.1000	0.3500 ± 0.0707	0.3000 ± 0.0000	1.3000 ± 0.8660	16.2333 ± 11.3896	25	25	25
Mg	230.0000	1390.0000 ± 98.9949	1765.0000 ± 332.3402	2043.3333 ± 652.7123	4246.6667 ± 1878.1995	5000	6000	6000
Mn	9.8000	81.2500 ± 11.6673	108.1000 ± 20.3647	78.9000 ± 26.9538	220.1667 ± 28.5672	2000	2000	2000
Mo	0.6700	5.3900 ± 0.5798	4.9900 ± 3.1113	0.4867 ± 0.1531	2.7933 ± 1.0378	7	5	5
Na	BLD	245.0000 ± 134.3503	450.0000 ± 14.1421	60.0000 ± 42.4264	BLD	40000	45000	40000
Nb	BLD	0.0040 ± 0.0000	0.0055 ± 0.0007	0.0033 ± 0.0015	0.0033 ± 0.0006			
Ni	0.2600	1.0750 ± 0.3182	1.0450 ± 0.3748	1.4000 ± 0.3897	1.9900 ± 0.3751	50	100	100
P	200.0000	1980.0000 ± 197.9899	2640.0000 ± 282.8427	1620.0000 ± 226.4950	1246.6667 ± 220.5297	6000	7000	6000
Pb	0.1100	0.4050 ± 0.0354	0.5950 ± 0.1344	0.4600 ± 0.1249	0.6800 ± 0.0700	10	100	100
Pd	BLD	0.0010	0.0010	BLD	BLD			
Pt	0.0010	0.0050	0.0010 ± 0.0000	0.0010 ± 0.0000	0.0010 ± 0.0000			
Rb	0.3100	1.9500 ± 0.4101	3.1800 ± 0.6647	30.1333 ± 7.8691	16.2333 ± 8.5360	200		
Re	0.0080	0.0385 ± 0.0064	0.1065 ± 0.0262	0.0540 ± 0.0374	0.8863 ± 0.5542			
S	300.0000	2000.0000 ± 0.0000	3050.0000 ± 212.1320	3033.3333 ± 288.6751	5966.6667 ± 1289.7028	5000	3000	3000
Sb	0.0300	0.1900 ± 0.0141	0.2950 ± 0.0919	0.4567 ± 0.1656	0.2467 ± 0.0351	70-150		
Sc	BLD	0.0800 ± 0.0141	0.0800 ± 0.0000	0.0967 ± 0.0153	0.0767 ± 0.0115			
Se	0.0220	0.1180 ± 0.0283	0.1085 ± 0.0148	0.1900 ± 0.0295	0.1893 ± 0.0359	5	5	5
Sn	0.0200	0.1050 ± 0.0636	0.1050 ± 0.0071	0.0367 ± 0.0115	0.0433 ± 0.0058	100	100	100
Sr	8.3100	53.0000 ± 11.3137	58.9000 ± 5.5154	52.5667 ± 18.0788	53.5667 ± 6.6003	1000	2000	2000
Ta	0.0010	0.0010 ± 0.0000	0.0010 ± 0.0000	0.0010 ± 0.0000	0.0015 ± 0.0007			
Te	0.0200	0.0300	0.0400	0.0250 ± 0.0071	0.0400 ± 0.0173			
Th	0.0090	0.0505 ± 0.0092	0.0590 ± 0.0212	0.0273 ± 0.0095	0.0573 ± 0.0091			
Ti	BLD	BLD	BLD	BLD	BLD			
Tl	0.0070	0.0120 ± 0.0028	0.0155 ± 0.0049	0.0047 ± 0.0006	0.0107 ± 0.0038			
U	0.0050	0.0245 ± 0.0021	0.0500 ± 0.0240	0.0127 ± 0.0015	0.0230 ± 0.0085	100		
V	0.1300	0.2550 ± 0.0495	0.3200 ± 0.0849	0.1500 ± 0.0361	0.2033 ± 0.0058		50	50
W	<0.01	0.1850 ± 0.0354	0.3250 ± 0.0919	0.0550 ± 0.0495	0.2133 ± 0.0611	20	20	20

Y	0.0330	0.0990 ± 0.0297	0.0870 ± 0.0283	0.5000 ± 0.0598	0.3383 ± 0.1279			
Zn	5.7000	38.7000 ± 1.2728	41.9500 ± 6.8589	25.0000 ± 5.9405	188.3333 ± 67.2632	500	500	300
Zr	0.2100	0.1800 ± 0.0000	0.200 ± 0.0141	0.2733 ± 0.3175	0.0733 ± 0.0058			

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negrita indican que rebasan el MNT para alguno de los diferentes animales referenciados.

Anexo XXXXII. Factor de acumulación de *A. farnesiana* y *P. velutina* bajo condiciones de campo. El factor de acumulación es el coeficiente del contenido de metales en tejidos aéreos de la planta y el contenido de metales en la rizósfera.

Metal	<i>A. farnesiana</i>	<i>P. velutina</i>	<i>P. velutina</i>
	10 %	10 %	20 %
Ag	0.34	1.51 ± 0.36	1.05 ± 0.10
Al	BLD	0.14 ± 0.01	0.21 ± 0.09
As	0.09	0.31 ± 0.01	0.41 ± 0.10
Au	0.10	0.40	2.75 ± 0.21
B	5.45	9.61 ± 0.24	16.81 ± 2.56
Ba	0.24	0.74 ± 0.12	0.62 ± 0.07
Be	BLD	BLD	BLD
Bi	0.14	0.73 ± 0.14	1.02 ± 0.48
Ca	6.84	41.31 ± 11.50	29.22 ± 1.99
Cd	2.25	20.5 ± 3.54	9.10 ± 1.27
Ce	0.23	0.87 ± 0.08	0.87 ± 0.31
Co	1.16	3.60 ± 1.31	2.15 ± 0.78
Cr	1.11	2.79 ± 1.52	3.15 ± 0.49
Cs	0.22	0.59 ± 0.13	1.24 ± 0.80
Cu	0.45	5.58 ± 1.78	2.58 ± 0.46
Fe	0.17	0.69 ± 0.08	0.72 ± 0.14
Ga	0.03	0.13 ± 0.03	0.16 ± 0.03
Ge	BLD	0.25 ± 0.04	0.35 ± 0.02
Hf	0.13	0.10 ± 0.01	0.15 ± 0.04
Hg	BLD	BLD	BLD
In	BLD	0.55 ± 0.17	0.57 ± 0.06
K	2.38	8.81 ± 0.16	11.36 ± 1.46
La	0.24	1.03 ± 0.28	0.81 ± 0.19
Li	0.11	0.08 ± 0.02	0.34 ± 0.00
Mg	3.90	16.87 ± 5.81	16.45 ± 2.56
Mn	4.78	35.25 ± 6.65	31.06 ± 2.90
Mo	0.19	1.32 ± 0.14	1.00 ± 0.7
Na	BLD	2.87 ± 1.11	2.56 ± 0.08
Nb	BLD	0.09 ± 0.02	0.12 ± 0.00
Ni	BLD	17.00	13.06 ± 4.68
P	5.71	42.51 ± 16.75	35.43 ± 0.10
Pb	0.18	0.76 ± 0.16	0.98 ± 0.18
Rb	0.14	0.57 ± 0.09	1.11 ± 0.17
Re	BLD	BLD	178.57
Sb	0.05	0.29 ± 0.03	0.41 ± 0.15
Se	BLD	BLD	4.20 ± 2.47
Sn	0.19	0.76 ± 0.34	0.78 ± 0.14
Sr	4.85	26.58 ± 8.54	19.32 ± 0.87
Ta	0.50	0.33 ± 0.00	0.29 ± 0.06
Te	1.25	1.67	1.67

Th	0.06	0.36 ± 0.12	0.31 ± 0.10
Ti	BLD	BLD	BLD
Tl	0.41	0.48 ± 0.09	0.77 ± 0.08
U	0.08	0.33 ± 0.01	0.45 ± 0.22
V	0.27	0.38 ± 0.14	0.33 ± 0.06
W	BLD	0.08 ± 0.01	0.13 ± 0.05
Y	0.21	0.83 ± 0.06	0.53 ± 0.16
Zn	5.04	33.4 ± 2.32	22.48 ± 1.81
Zr	0.20	0.12 ± 0.00	0.17 ± 0.01

BLD= Bajo el límite de detección. Valores en negritas representan que la especie se comportan cómo fitoextractoras de determinado metal (por arriba de 1).

XIII. BIBLIOGRAFÍA

- Adriano D. C., Wenzel W. W., Vangronsveld J., & Bolan N. S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122: 121-142.
- Alarcón A., & Ferrera-Cerrato R. 2013. Biorremediación de suelos y aguas contaminadas con compuestos orgánicos e inorgánicos. Trillas, Ciudad de México, 333 pp.
- Alef K. 1995. Soil respiration. En: Alef K. & Nannipieri P. (eds): *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London, pp. 214-222.
- Amador-Hernández J. 2010. Espectrometría óptica atómica. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 14(41): 3-10.
- Amberger A. 1988. *Pflanzenernährung*. UTB Ulmer, Stuttgart, 264 pp.
- Bacchetta G., Cappai G., Carucci A., & Tamburini E. 2015. Use of native plants for the remediation of abandoned mine sites in mediterranean semiarid environments. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94: 326-333.
- Beesley L., Marmiroli M., Pagano L., Pighi V., Fellet G., Fresno T., Vamerali T., Bandiera M., & Marmiroli N. 2013. Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Science of the Total Environment*, 454-455: 598-603.
- Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M.B., & Scheckel K. 2014. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, 266: 141-166.
- Brady N. C., & Weil R. R. 2017. *The nature and properties of soils*. Columbus, Ohio, 1086 pp.
- Brooks R. R. 1998. *Plants that hyperaccumulate heavy metals: Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*. Wallingford, UK: CAB International, 380 pp.
- Campiteli P., Ceppi S., Velasco M., & Rubenacker A. 2014. *Compostaje: obtención de abonos de calidad*. Editorial Brujas, Buenos Aires, Argentina, 82 pp.
- Caneva G., Nugari M.P., & Salvadori O. 2000. *La biología en la restauración*. Editorial Nerea, S. A, 280 pp.
- Carpena R. O., & Bernal M. P. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16: 1-3.
- Chapin III F. S., Bloom A. J., Field C. B., & Waring R. H. 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *BioScience*, 37: 49-57.
- Coleman D. C., Anderson R. V., Cole C. V., Elliott E. T., Woods L., & Campion M. K., 1978. Trophic interactions in soils as they affect energy and nutrient dynamics. IV. Flows of metabolic and biomass carbon. *Microbial Ecology*, 4: 373-380.
- Collins Y. E., & Stotzky G. 1989. Factors affecting the toxicity of heavy metals to microbes. En: Beveridge T. J. & Doyle R. J. (eds). *Metal ions and bacteria*, Wiley, Toronto, pp. 31-90.

- Cunningham S. D., Berti W. R., & Huang J. W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*, 13: 393–397.
- de la O-Villanueva M., Meza-Figueroa D., Maier R. M., Moreno D., Gomez-Alvarez A., Del Rio-Salas R., Mendivil H., & Montijo A. 2013. Procesos erosivos en jales de la presa I de Nacozari de Garcia, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65: 27–38.
- Diaz L. F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., & Stentiford E. 2007. *Compost Science and Technology*, Elsevier, Oxford, 363 pp.
- Dold B. 2010. Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management, Waste Management, Er Sunil Kumar (ed.). Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/waste-management/basic-concepts-in-environmental-geochemistry-of-sulfidic-mine-waste-management>.
- Dungait J. A., Hopkins D. W., Gregory A. S., & Whitmore A. P. 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 18: 1781–1796.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2007. Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf>.
- Garbisu C., & Alkorta I. 2003. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *Mineral Processing and Environmental Protection*, 3: 229-236.
- Gil-Loaiza J., White S. A., Root R. A., Solis-Dominguez F. A., Hammond C.M., Chorover J., & Maier R. M. 2016. Phytostabilization of mine tailings using compost-assisted direct planting: Translating greenhouse results to the field. *Science of the Total Environment* 565: 451-461.
- Ginocchio R., León-Lobos P., Arellano E. C., Anic V., Ovalle J. F., & Baker A. J. M. 2017. Soil physicochemical factors as environmental filters for spontaneous plant colonization of abandoned tailing dumps. *Environmental Science and Pollution Research*, 24: 13484–13496.
- Grandlic C. J. 2008. Tesis doctoral: Plant growth-promoting bacteria suitable for the phytostabilization of mine tailings. Universidad de Arizona.
- Helawell J. M. 1988. Toxic substances in rivers and streams. *Environ Pollut*, 50: 61-85.
- Huang L., Baumgartl T., & Mulligan D. 2012. Is rhizosphere remediation sufficient for sustainable revegetation of mine tailings?. *Annals of Botany*, 110: 223–38.
- Huang, L. N., Tang, F. Z., Song, Y. S., Wan, C. Y., Wang, S. L., Liu, W. Q., & Shu, W. S. 2011. Biodiversity, abundance, and activity of nitrogen-fixing bacteria during primary succession on a copper mine tailings. *FEMS Microbiology Ecology*, 78: 439–450.
- INEGI. 2006. Edafología. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/edafologia> (consultado en mayo 2017).
- Isermeyer H. 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Z. Pflanzenemäh. Bodenk*, 56: 26-38.
- Jordan S. N., Mullen G. J., & Courtne, R. G. 2008. Utilization of spent mushroom compost for the revegetation of lead-zinc tailings: Effects on physico-chemical properties of tailings and growth of *Lolium perenne*. *Bioresource Technology*, 99: 8125–8129.

- Karthikeyan R., & Kulakow P. A. 2003. Soil plant microbe interactions in phytoremediation. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 78, 51–74.
- Kennen K. & Kirwood N. 2015. *Phyto: Principles and resources for site remediation and landscape design*. Routledge, New York, 378 pp.
- Knox A. S., Seaman J., Adriano D. C., & Perzynski G. 2000. Chemophytostabilization of metals in contaminated soil. En: Wise D. L., Trantolo D. J., Chichon E. J., Inyang H. I., Stottmeister U. (eds.) *Bioremediation of Contaminated Soils*. Marcel Dekker, New York/Basel, pp. 811-836.
- Labrador-Moreno J. S. 1996. *La materia orgánica en los agrosistemas*. Ministerio de Agricultura, Madrid, 176 pp.
- Labrador-Moreno J. S. 2002. *La materia orgánica en los agrosistemas*. Mundi Prensa Libros S.A. Madrid, 293 pp.
- Leung H. M., Wang Z. W., Ye Z. H., Yung K. L., Peng X. L., & Cheung K. C. 2013. Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A review. *Pedosphere*, 23: 549–563.
- Li X., Huang L., Li X., & Huang L. 2015. Toward a New Paradigm for Tailings Phytostabilization—Nature of the Substrates, Amendment Options, and Anthropogenic Pedogenesis. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45: 813–839.
- Lottermoser B. G. 2010. *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, New York, 400 pp.
- Marschner, H. 2012. *Mineral Nutrition of Higher Plant*, third ed. Academic Press, London, England, UK, 651 pp.
- Martinez-Yrizar A., Felger R. S., & Burquez A. 2010. Los ecosistemas terrestres: un diverso capital natural. En: Molina-Freaner F.E., Van-Devender T.R. (eds). *Diversidad biológica de Sonora*. Ciudad de México: CONABIO-UNAM, 129–156.
- Mendez M. O., & Maier, R. M. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments - An emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116: 278–283.
- Meza-Figueroa D., Maier R. M., de la O-Villanueva M., Gómez-Álvarez A., Moreno-Zazueta A., Rivera J., Campillo A., Grandlic C. J., Anaya R., & Palafox-Reyes J. 2009. The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico. *Chemosphere*, 77: 140–147.
- Moreno-Casco J., & Moral Herrero R. 2008. *Compostaje*. Mundi Prensa Libros S.A., Madrid, 570 pp.
- National Research Council. 2005. *Mineral Tolerance of Animals*. 2nd revised ed. Washington, DC: National Academies Press.
- Nieto-Garibay A., Murillo-Amador B., Troyo-Diéguez E., García-Hernández J. L., Aguilar-García M. G. J., Holguín-Peña R. J., & Larrinaga-Mayoral J. A. 2013. *La Composta: Importancia, elaboración y uso agrícola*. Trillas, Ciudad de México. 73 pp.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la*

Federación, 31 de diciembre de 2002. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>

NOM-141-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción y post-operación de presas de jales. Diario Oficial de federación, 13 de septiembre de 2004. Disponible en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Norma Oficial Mexicana que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

NOM-157-SEMARNAT-2009. Norma Oficial Mexicana que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Diario Oficial de la Federación, 30 de agosto de 2011. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/134777/34._NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-157-SEMARNAT-2009.pdf

O'Dell R., Silk W., Green P., & Claassen V. 2007. Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentrations and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook and Arn.). *Environmental Pollution*, 148: 115–124.

Ortega-Larrocea M. del P., Xoconostle-Cázares B., Maldonado-Mendoza I. E., Carrillo-González R., Hernández-Hernández J., Díaz-Garduño M., López-Meyer M., Gómez-Flores L., & González-Chávez Ma. del C. 2010. Plant and fungal biodiversity from metal mine wastes under remediation at Zimapan, Hidalgo, Mexico. *Environmental Pollution*, 158: 1922-1931.

Palomino-Medina L. A. 2016. Tesis de maestría: Origen y caracterización geoquímica – mineralógica de las sales eflorescentes en jales mineros: caso Nacozari de García Sonora, México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Parra A., Zornoza R., Conesa E., Gómez-López M. D., & Faz A. 2016. Evaluation of the suitability of three Mediterranean shrub species for phytostabilization of pyritic mine soils. *Catena*, 136: 59–65.

Parraga-Aguado I., Gonzalez-Alcaraz M. N., Alvarez-Rogel J., Jimenez-Carceles F. J., & Conesa H. M. 2013. The importance of edaphic niches and pioneer plant species succession for the phytomanagement of mine tailings. *Environmental Pollution*. *Environmental Pollution* 176: 134-143.

Pérez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M. S., Cornwell W. K., Craine J. M., Gurrich D. E., Urcelay C., Veneklaas E. J., Reich P. B., Poorter L., Wright I. J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A. C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J. G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., van der Heijden M. G. A., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M. V., Conti G., Staver A. C., Aquino S., & Cornelissen J. H. C. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61: 167-234.

PerkinElmer, Incorporation. 2005. Award-Winning Results 2400 Series II CHNS/O Elemental Analysis. Printed in U.S.A, 11 pp.

- Ponce-de-León-Hill C., Hernández-Quiroz M., Venegas-Pérez C., & Cram-Heydrich S. 2012. Conceptos y procedimientos para el análisis de muestras ambientales. Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, 123 pp.
- Ramos-Arroyo Y. R., & Siebe-Grabach C. D. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23: 54-74.
- Raskin I., Kumar P. B. A. N., Dushenkov S., & Salt D.E. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol*, 5: 285-290.
- Román P., Martínez M. M., & Pantoja A. 2013. Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago Chile, 108 pp.
- Romero F. M., Armienta M. A., Gutiérrez M. E., & Villaseñor G. 2008. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24: 43–54.
- Romero, F. M. 2004. Tesis doctoral: Procesos Geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos. “El Fraile”, Taxco, Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez-López A. S., González-Chávez M. C. A., Carrillo-González R., Vangronsveld J., & Díaz-Garduño M. 2015. Wild flora of mine tailings: perspectives for use in phytoremediation of potentially toxic elements in a semi-arid region in Mexico. *International Journal of Phytoremediation*, 17: 476–484.
- Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C. Bernal M. P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresour Technol*, 78: 301-308.
- Santos A. E., Cruz-Ortega R., Meza-Figueroa D., Romero F. M., Sánchez-Escalante J. J., Maier R. M., Neilson J. W., Alcaraz L. D., & Molina-Freaner, F. E. 2017. Plants from the abandoned Nacozari mine tailings : evaluation of their phytostabilization potential. *PeerJ*, 5:e3280.
- Schulze E. D., Beck E., & Müller-Hohenstein K. 2005. *Plant Ecology. Stress: The International Journal on the Biology of Stress*. Springer, Verlag, Heidelberg, 702 pp.
- Servicio Meteorológico Nacional. 2017. Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/es/?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28 (consultado en junio de 2017).
- Soil Science Division Staff. 2017. *Soil Survey Manual*. United States Department of Agriculture. Handbook No. 18, U.S.A., 603pp.
- Solis-Dominguez F. A., White S. A., Hutter T. B., Amistadi M. K., Root R. A., Chorover J., & Maier R. M. 2012. Response of key soil parameters during compost-assisted phytostabilization in extremely acidic tailings: Effect of plant species. *Environmental Science and Technology*, 46: 1019–1027.
- Shu W. S., Ye Z. H., Zhang, Z. Q., Lan C. Y., & Wong M. H. 2005. Natural colonization of plants on five lead/zinc mine tailings in southern China. *Restoration Ecology*, 13: 49–60.

- Torres-Cedillo L. 2015. Ficha técnica sobre actividades agrícolas, pecuarias y de traspatio - SAGARPA: Elaboración de la composta. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20Composta.pdf>
- Tuomela M., Vikman M., Hatakka A. & Itavaara M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresour Technol.*, 72:169-183.
- Valentín-Vargas A., Root R. A., Neilson J. W., Chorover J., & Maier R. M. 2014. Environmental factors influencing the structural dynamics of soil microbial communities during assisted phytostabilization of acid-generating mine tailings: A mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 500–501: 314–324.
- van Reeuwijk L. P., 1992. Método de Bray-Kurtz. En: *Procedures for soil analysis*, 3rd Ed. International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen, the Netherlands, 34pp.
- van Rensburg L., & Morgenthal T. 2004. The effect of woodchip waste on vegetation establishment during platinum tailings rehabilitation. *South African Journal of Science*, 100: 294–300.
- Volke Sepúlveda T., Velasco-Trejo J. A. & de la Rosa-Pérez David A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México*, 141pp.
- Wang L., Ji B., Hu Y., Liu R., & Sun W. 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184: 594–600.
- Yang S., Cao J., Hu W., Zhang X., & Duan C. 2013. An evaluation of the effectiveness of novel industrial by-products and organic wastes on heavy metal immobilization in Pb-Zn mine tailings. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 15: 2059-2067.
- Zhang H. B., Shi W., Yang M. X., Sha T., & Zhao Z. W. 2007. Bacterial diversity at different depths in lead-zinc mine tailings as revealed by 16S rRNA gene libraries. *Journal of Microbiology*, 45: 479–84.
- Zornoza R., Faz Á., Carmona D. M., Acosta J. A., Martínez-Martínez S., & De Vreng A. 2013. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. *Chemosphere*, 90: 2606–2613.