



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

ECOLOGÍA

Microcosmos bajo la copa de *Eucalyptus camaldulensis*

en un matorral xerófilo

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

JESÚS MORELOS REBOLLAR

TUTOR: Dr. Zenón Cano Santana

Facultad de Ciencias, UNAM

COMITÉ TUTOR: Dra. Silke Cram Heydrich

Instituto de Geografía, UNAM

COMITÉ TUTOR: Dr. Alejandro Zavala Hurtado

Unidad Iztapalapa, UAM



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

ECOLOGÍA

Microcosmos bajo la copa de *Eucalyptus camaldulensis*

en un matorral xerófilo

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

JESÚS MORELOS REBOLLAR

TUTOR: Dr. Zenón Cano Santana

Facultad de Ciencias, UNAM

COMITÉ TUTOR: Dra. Silke Cram Heydrich

Instituto de Geografía, UNAM

COMITÉ TUTOR: Dr. José Alejandro Zavala Hurtado

Unidad Iztapalapa, UAM

COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
OFICIO FCIE/DAIP/0390/2022
ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **13 de junio de 2022** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Ecología** del estudiante **MORELOS REBOLLAR JESÚS** con número de cuenta **311145223** con la tesis titulada **“Microcosmos bajo la copa de *Eucalyptus camaldulensis* en un matorral xerófilo”**, realizada bajo la dirección del **DR. ZENÓN CANO SANTANA**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: **DR. CARLOS MARTORELL DELGADO**
Vocal: **DR. JORDAN KYRIL GOLUBOV FIGUEROA**
Vocal: **DR. BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA**
Vocal: **DR. SOL CRISTIANS NIIZAWA**
Secretario: **DR JOSÉ ALEJANDRO ZAVALA HURTADO**

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 23 de agosto de 2022

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM por permitirme continuar con mi preparación académica a través del desarrollo de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar estos estudios (CVU: 1034134).

A mi asesor, el Dr. Zenón Cano Santana y a mi comité tutor, integrado por la Dra. Silke Cram Heydrich y el Dr. José Alejandro Zavala Hurtado, por sus valiosas enseñanzas para desarrollar y concluir este trabajo.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Al Dr. Zenón Cano Santana, por la confianza y la libertad para desarrollar mi trabajo con independencia, pero acompañándome en cada paso y corrigiendo mi camino.

A la Dra. Silke Cram Heydrich, por sus valiosos comentarios para enfocar y siempre buscar mejorar mi trabajo.

Al Dr. José Alejandro Zavala Hurtado, por su amabilidad de aceptar a participar en este trabajo y por su generosidad de compartir siempre sus conocimientos.

Al Dr. Johnattan Hernández Cumplido, por su apoyo en campo y en el desarrollo de este trabajo.

A los doctores Elizabeth Quintana Rodríguez y Domancar Orona Tamayo por el apoyo para la colecta de muestras de suelo y la realización de los análisis de laboratorio en las instalaciones del Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC).

Al M. en C. Iván Castellanos Vargas, por el apoyo técnico así como por los comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo.

A la Dra. Yuriana Martínez Orea, por su invaluable labor en la identificación de las especies vegetales.

A los servicios sociales y amigas que me ayudaron en campo: Alejandra Argüelles, Mirely Guzmán, Jazmín López, Verónica Herrera, Georgina Corona, Irais Vilchis y Diana Ferrusca. Gracias por su invaluable tiempo.

A Artemisa Miranda Mondragón, por la revisión de la concordancia de la literatura.

A la profesora Julieta Sierra, por todo su apoyo y por permitirme trabajar a su lado.

A Marco, por siempre estar. Por el apoyo incondicional en esto y en tantas cosas más. Gracias por todos estos años de tu sincera amistad.

A Uriel, por el apoyo en campo y por toda la ayuda para construir este trabajo. Gracias por esta amistad que aún lejos nos mantiene unidos.

A Pepe, por acompañarme desde el día uno de haber comenzado este trabajo. Gracias por tu amistad y por seguir jugando a los biólogos juntos.

A Vero, por tu ayuda en campo, y sobre todo por siempre poder encontrarte.

A Daniela, Mónica, Araceli, Ana y Dulce. Gracias por compartir a veces poco, a veces mucho tiempo y saber que estamos ahí siempre que nos buscamos.

Al laboratorio de Interacciones y Procesos Ecológicos. Un espacio de desarrollo académico en libertad.

A la REPSA, un oasis natural en la ciudad que al conocerlo se aprende a querer y valorar.

A la UNAM, por brindarme una vez más la posibilidad de nutrirme de la pluralidad de ideas y pensamientos dentro de sus aulas.

A las víctimas de la pandemia de covid-19, sobre todo a aquellos que sus condiciones socioeconómicas no les permitieron ofrecer una batalla justa por su vida.

A la sociedad mexicana que todos los días trabaja por construir una mejor nación.

A mi abuelita, Susana.

El recuerdo de tu amor ocupa el espacio que dejó el dolor de tu ausencia.

A mi mamá, Yolanda.

Por transformar tu vida en nuestros triunfos y derrotas.

Este logro, como siempre y como todos, es tuyo.

A mis hermanos Magda, Yola, Gui, Vero e Isra.

Cada uno de ustedes ha construido una parte de mí.

A mis sobrinos Diego, Ángel, Amy y Erick.

La llegada de cada uno me ha mostrado que el futuro

siempre nos espera con extraordinarios obsequios.

¿A dónde iremos donde la muerte no existe? (...)

Aun los príncipes a morir vinieron.(...)

Que tu corazón se enderece:

aquí nadie vivirá para siempre.

Miguel León-Portilla, *Cantares mexicanos*

(...) cómo quieres que me gusten las flores si no conozco su nombre verdadero (...)

si yo digo bugambilia, tú piensas en las que has visto en tu pueblo (...).

Y la bugambilia forma parte de tu ser, es una parte de tu cultura,

es eso que recuerdas después de haberlo olvidado.

Esto es muy hermoso, pero no es mío, porque lo que dicen el ciruelo y los eucaliptos

no lo dicen para mí, ni a mí me lo dicen.

Octavio Paz, *El laberinto de la soledad*

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Interacciones y microcosmos	4
1.2 Las especies exóticas invasoras	5
1.3 Afectaciones ecológicas de los eucaliptos	6
1.4 Los eucaliptos en México	10
1.5 Los componentes bióticos de la REPSA.....	12
1.6 Justificación	13
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	14
III. MÉTODOS	15
3.1 Sitio de estudio.....	15
3.2 Especies estudiadas.....	17
3.3 Muestreo de la vegetación	20
3.4 Radiación fotosintéticamente activa	21
3.5 Suelo	21
3.6 Análisis de datos	24
3.6.1 Muestreos de la vegetación	24
3.6.2 Radiación fotosintéticamente activa.....	26
3.6.3 Suelo.....	26
3.6.4 Análisis integrado.....	26
IV. RESULTADOS	27
4.1 Los ensamblajes vegetales de los microcosmos	27
4.2 Radiación fotosintéticamente activa	38
4.3 Rasgos del suelo.....	38
4.4 Análisis integrado	42
V. DISCUSIÓN	44
5.1 Las comunidades vegetales de los microcosmos	44

5.2 Rasgos del suelo y su relación con las comunidades vegetales	48
5.3 El rol de los eucaliptos en la REPSA.....	53
5.4 Consideraciones sobre el diseño experimental	54
VI. CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO 1	75
ANEXO 2	79
ANEXO 3	82

Citar como: Morelos-Rebollar, J. 2022. Microcosmos bajo la copa de *Eucalyptus camaldulensis* en un matorral xerófilo. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. 83 pp.

RESUMEN

Las especies exóticas invasoras son uno de los principales impulsores de cambio en los ecosistemas naturales a nivel global. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), localizada en la Ciudad de México, es una reserva urbana con una vegetación dominante de matorral xerófilo. En 1950 se introdujeron en los terrenos que hoy ocupa la REPSA árboles de eucalipto, plantas consideradas como especies invasoras en diversos ecosistemas alrededor del mundo. En este trabajo se buscó analizar la composición de los ensamblajes de plantas, la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente y los rasgos químicos del suelo presentes bajo la copa de eucaliptos *Eucalyptus camaldulensis* y compararlos con lo registrado bajo el dosel de otras dos especies vegetales nativas (el tepozán *Buddleja cordata* y el chapulixtle, *Dodonaea viscosa*) y zonas abiertas (sin cobertura de especies arbóreas). Para ello se seleccionaron 15 ejemplares de cada especie y 15 zonas abiertas dentro de las zonas núcleo oriente y poniente de la REPSA. En cada sitio se muestrearon las comunidades vegetales durante dos estaciones (lluvias, 2020 y secas, 2021). Durante la estación seca se midió la RFA en los cuatro hábitats y se colectaron muestras de suelo para medir sus propiedades químicas. Se encontró que en ambas temporadas la diversidad vegetal (Shannon) fue similar entre los cuatro hábitats. La riqueza de plantas de todos los hábitats disminuyó de lluvias (12) a la época de secas (4). La RFA fue significativamente mayor en las áreas sin cobertura ($1,962 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) respecto a los demás sitios ($1,112\text{-}1,368 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). En cuanto al análisis del suelo, el pH, la conductividad eléctrica, el porcentaje de humedad, el contenido de polifenoles, así como los porcentajes de carbono y nitrógeno, no presentaron diferencias significativas entre sitios. Los resultados de este trabajo muestran la ausencia de efectos negativos sobre las comunidades vegetales y las características del suelo asociados a la presencia de eucaliptos.

Se discute la relevancia del factor de aislamiento espacial entre los árboles de eucalipto dentro de las zonas núcleo de la reserva como elemento determinante para que las afectaciones documentadas en las zonas de amortiguamiento dentro de la REPSA, así como en otros ecosistemas no se presenten en estas zonas. Este puede ser el primer estudio de una investigación más amplia que integre un mayor número de factores que confirmen la función de los eucaliptos en este ecosistema.

ABSTRACT

Invasive species are one of the main drivers of change in natural ecosystems around the world. The Pedregal de San Angel Ecological Reserve (PSAER), located in Mexico City, is an urban reserve with a dominant vegetation of xerophytic scrub. In 1950, eucalypts were introduced into the preserve. The aim of this work was to evaluate the effect of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) on the plant assemblages, incident photosynthetically active radiation (PAR) and soil chemical traits and compare them with two other native tree species: tepozán *Buddleja cordata* and chapulixtle, *Dodonaea viscosa* and to open areas (with no trees). For this, 15 tree species (per 3 species) and 15 open areas were selected inside the preserve. In each place we determine plant community structure during two seasons (rainy and dry, 2020-21). During dry season, PAR was measured in the four habitats and soil samples were collected to measure their chemical properties. It was found that in both seasons plant diversity was similar among the four habitats according Shannon-Wiener index. Plant richness of all habitats decreased from rainy (12) to dry season (4). PAR was significantly higher in open areas ($1,962 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) relative to the other sites

(1,112-1,368 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). As for soil analysis: pH, electrical conductivity, moisture content, polyphenol content, as well as carbon and nitrogen percentages did not show significant differences between sites. The results of this work show the absence of negative effects on plant communities and soil characteristics associated with the presence of eucalypts. The relevance of the spatial isolation among eucalypts within the core zones of the reserve is discussed as a determining element for the impacts documented in the buffer zones within the PSAER as well as in other ecosystems not to occur in these zones. And it may be the first study that integrates several factors that confirm the role of eucalypts in this ecosystem.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Interacciones y microcosmos

Las interacciones intra e interespecíficas que se desarrollan al interior de un hábitat, como la competencia, la facilitación y el mutualismo, repercuten en la composición y estructura de las comunidades. Así mismo, establecen las condiciones que a mayor escala inciden en las características, la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas (Grimm, 1995; Raven *et al.*, 2013). Sin embargo, no todos los miembros de las comunidades modifican en la misma magnitud las características y propiedades del medio.

Las especies dominantes como los árboles, en el caso de las plantas, modifican la dinámica biótica y ambiental debido a sus características físicas y fisiológicas (Ovington, 1955; Callaway, 2007). A escala local, los organismos de porte arbóreo pueden generar entornos particularizados dentro de los cuales se presentan condiciones microambientales que posibilitan el establecimiento y desarrollo de los diversos miembros que componen a las comunidades, es decir, microcosmos naturales (Srivastava *et al.*, 2004).

El análisis de microcosmos fue utilizado por Forbes (1887) como un enfoque de estudio en el campo de la limnología, se trata de una perspectiva que pretende estudiar a un organismo específico en el contexto de su entorno y no como un elemento aislado (Hansson *et al.*, 2013). La perspectiva de estudio de microcosmos permite conocer las interacciones de los miembros de las comunidades dentro de un espacio de menor extensión espacial y temporal que hacerlo con todos los componentes del hábitat, al tiempo que toma en cuenta la variación de las condiciones ambientales inherentes al ecosistema (Srivastava *et al.*, 2004).

1.2 Las especies exóticas invasoras

Las especies exóticas invasoras (EEI) son todas aquellas especies cuyas partes, gametos o propágulos pueden sobrevivir y reproducirse fuera de su área natural y potencial de dispersión, y cuya presencia en un ecosistema o hábitat natural o seminatural constituye un agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa (IUCN, 2000).

Debido a sus características las especies exóticas pueden modificar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas y, a su vez, comprometen la provisión de los servicios ecosistémicos (Aguirre-Muñoz y Mendoza-Alfaro, 2009).

La última versión del Informe de Evaluación Global sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES, 2019) cataloga a las EEI junto a los cambios en el uso de la tierra y el mar, la explotación directa de organismos, el cambio climático, y la contaminación, como los cinco impulsores directos de cambio en los sistemas naturales a nivel global. Este informe indica que las valoraciones sobre el control y erradicación de este tipo de especies son escasas, al mismo tiempo que sus tasas de dispersión continúan incrementándose. Por lo cual se insta a las organizaciones académicas y gubernamentales, al sector privado y a la sociedad civil para colaborar en la gestión y erradicación de especies invasoras con el objetivo de salvaguardar la diversidad biológica existente, los servicios ecosistémicos que brindan y el bienestar humano.

1.3 Afectaciones ecológicas de los eucaliptos

El género *Eucalyptus* L'Hér. (Myrtaceae) es nativo de Australia y algunas islas de Asia y Oceanía, y está integrado por más de 700 especies descritas. Muchas de estas especies han sido introducidas a diversos países debido a sus múltiples usos y aplicaciones con fines comerciales, medicinales y de manejo ambiental (Coppen, 2002).

A pesar de los grandes dividendos que su introducción ha generado para las personas, a finales del siglo pasado la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) informó que los eucaliptos debían ser analizados dadas las afectaciones que podían ocasionar en los hábitats naturales y en los sitios de aprovechamiento en donde fueron introducidos (Poore y Fries, 1987).

Actualmente, algunas especies de este género están identificadas como EEI a nivel local o regional en distintas partes del mundo (Simberloff y Rejmanek, 2011). Debido a esto, en los últimos años se han publicado diversas investigaciones sobre las plantaciones comerciales y en los sistemas naturales en los que los eucaliptos han sido introducidos. Tales investigaciones buscan conocer la forma en que estas especies emplean los recursos ambientales, así como su rol dentro las redes de interacción bióticas y con el medio físico que habitan (Anexo 1).

Uno de los factores ambientales en los que se han documentado cambios tras la introducción de los eucaliptos es la disponibilidad de radiación solar. Este componente ecológico resulta fundamental en el ecosistema pues representa la provisión energética tanto para el desarrollo de los organismos productores como para el resto de los miembros de la comunidad (Odum *et al.*, 2006).

Yang *et al.* (2018), por ejemplo, demostraron que las hojas de estos árboles presentan una tasa fotosintética particularmente alta respecto a lo reportado para plantas C3 (el mismo tipo de metabolismo con el que cuentan los eucaliptos), característica que les permite un desarrollo más exitoso que el de organismos vecinos.

Por su parte, Saccol *et al.* (2017) discuten que la baja diversidad de la herpetofauna que habita las plantaciones de eucalipto está asociada con una menor incidencia de luz que penetra en el sotobosque en comparación con ecosistemas nativos; mientras que Johar *et al.* (2017) discuten que el rendimiento de trigo que se cultiva en conjunto con eucaliptos se ve disminuido debido a la limitación de disponibilidad de luz que provocan estos árboles.

Un segundo elemento ambiental que se ha visto alterado por el asentamiento de especies exóticas como los eucaliptos al modificar sus características, procesos y dinámica, es el suelo (Ehrenfeld, 2003). El suelo es un componente ecosistémico que da soporte a todos los hábitats terrestres, proporciona los recursos y condiciones para el establecimiento, propagación y supervivencia de las comunidades bióticas y es el medio en el cual interactúan la materia orgánica y mineral y se presentan diversos procesos de recambio energético (Osman, 2013). Tales alteraciones pueden ser determinantes para la estabilidad de los suelos y tienen de forma simultánea una incidencia directa sobre la diversidad de las macro y micro comunidades (Lorenzo y González, 2010).

Zhang *et al.* (2015) analizaron el efecto de los eucaliptos sobre la calidad del suelo en plantaciones comerciales que reemplazaron una zona previamente poblada por pinos, y encontraron que el índice de calidad del suelo basado en parámetros bioquímicos se redujo tras plantar estos árboles. No obstante, discuten que las afectaciones sobre las propiedades

del suelo pueden ser compensadas con estrategias de manejo, como la fertilización y el mantenimiento de la cobertura vegetal de especies de plantas con tallas pequeñas. Por su parte, Zhao *et al.* (2014) reportan una reducción en el índice de calidad de los suelos después de la introducción de eucaliptos en comparación con zonas que albergan bosques secundarios y plantaciones de pinos. Estos resultados se basaron en la medición de rasgos fisicoquímicos, así como en la disponibilidad de nutrientes, por lo cual discuten la necesidad de emplear estrategias para la conservación de los atributos edáficos en las áreas de introducción de estas especies.

Otro rasgo de análisis fundamental sobre la calidad de los suelos en la interacción con los eucaliptos ha sido la modificación del pH que éstos provocan. Soumare *et al.* (2016) encontraron que los eucaliptos acidifican los sitios donde son plantados, lo que deriva en consecuencias negativas sobre la cantidad, actividad y diversidad de la comunidad microbiana edáfica. Es por ello, que sugieren tomar en cuenta esta evidencia para la generación de programas de reforestación y preservación ambiental.

Por otra parte, Chanie *et al.* (2013) concluyen que debido a su elevada tasa de crecimiento y a las grandes densidades de sus raíces, los eucaliptos reducen las reservas de agua y pueden incluso afectar la infiltración del agua en el suelo; en tanto que Afzal *et al.* (2018) discuten que estos organismos son más eficientes en la utilización del agua en comparación con otras especies y mencionan que su adopción debe estar en función de los presupuestos hídricos de cada lugar donde se deseen introducir.

Finalmente, un tema que ha recibido particular atención a lo largo del tiempo ha sido el rol alelopático de los eucaliptos en los ecosistemas. La alelopatía es un proceso que

involucra la producción de metabolitos secundarios que limitan el crecimiento y desarrollo de otros sistemas biológicos (Chou, 2006). Entre los compuestos alelopáticos generados por las plantas se encuentran los polifenoles, flavonoides, alcaloides, terpenoides y glucósidos cianogénicos; y la vía de liberación de estos compuestos al ambiente puede presentarse a través de la volatilización, la lixiviación, la exudación de las raíces o la descomposición de los residuos vegetales en el suelo (Chou, 2006).

En este sentido, se ha investigado el papel que tienen estas sustancias aleloquímicas producidas por los eucaliptos tanto en el medio natural como en sistemas *in vitro*. Por ejemplo, la revisión de Espinosa-García (1996) incluye una serie de experimentos y observaciones llevadas a cabo a finales del siglo pasado que ofrecen evidencia sobre los efectos alelopáticos causados por distintas especies de eucaliptos. Entre las principales afectaciones se mencionan, la limitación de la germinación, el crecimiento y el desarrollo de plantas vecinas tanto en ecosistemas naturales como en cultivos agrícolas. Sin embargo, se discute que estos efectos dependen tanto de la especie de eucalipto que se maneje como de las características del ambiente y de las especies con las que cohabite.

En cuanto a publicaciones más recientes, Chu *et al.* (2014) llevaron a cabo un experimento en campo en el que encontraron una disminución en el crecimiento de plántulas y organismos juveniles, así como una reducción de la diversidad de las especies del sotobosque que cohabitaban con los eucaliptos.

Por su parte, Ahmed *et al.* (2018) y Zhang *et al.* (2010) discuten que los compuestos químicos con carácter alelopático generados por los eucaliptos y depositados en el suelo tienen un efecto supresor sobre el desarrollo de plantas adyacentes; en tanto que Martins *et*

al. (2013) señalan que los compuestos provenientes de la degradación de las hojas de eucalipto que se incorporan al suelo pueden afectar el crecimiento de los microorganismos edáficos y desencadenar consecuencias negativas sobre los procesos de ciclaje y aprovechamiento de nutrientes, la biodiversidad y la generación de servicios ecosistémicos.

1.4 Los eucaliptos en México

Los eucaliptos han sido introducidos a México en distintas épocas para atender problemáticas particulares. Hinke (2000) señala que durante el siglo XIX, la comunidad médica y científica impulsó la introducción de estos organismos basados en la idea de que su adopción funcionaría como una herramienta de saneamiento en las ciudades y que sus derivados servirían para el tratamiento de enfermedades de tipo respiratorio principalmente. Tiempo después, a principios del siglo XX los científicos de la época alertaron sobre la pérdida de recursos forestales en la capital del país y las problemáticas que esto traería. Con el objetivo de reforestar y controlar las inundaciones en la entidad se desarrolló un plan de introducción de eucaliptos fundado en que su eficiente aprovechamiento de agua y elevada tasa de crecimiento contrarrestarían estos problemas (Ezcurra *et al.*, 1999; Cano-Santana *et al.*, 2006).

Durante la década de 1950, de forma simultánea a la construcción del *campus* de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se llevó a cabo la plantación de eucaliptos con fines ornamentales tanto al interior de las vías de comunicación del nuevo complejo educativo como en sus circuitos exteriores (Segura-Burciaga, 1995).

Años después, hacia finales del siglo XX, la comunidad universitaria demandó la protección de los remanentes del ecosistema natural del Pedregal de San Ángel y uno de los últimos ambientes naturales en el entonces Distrito Federal. Como respuesta a esta petición, el 3 de octubre de 1983, bajo la rectoría del Dr. Octavio Rivero Serrano, se publicó el acuerdo “Beneficia a la zona sur del Distrito Federal la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria”. Mediante este documento quedaban protegidas por la universidad 124.4 ha de matorral para su conservación e investigación y se creaba la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA; Rivero-Serrano, 1983).

En concordancia con esta visión de cuidado y preservación ambiental, y en forma análoga a la preocupación a nivel mundial sobre los efectos de los eucaliptos sobre los sistemas naturales, en el año de 1991 la UNAM, durante el periodo de rectoría del Dr. José Sarukhán, implementó el programa “Control ecológico del campus”. A través de este programa se buscaba que el empleo y manejo de los recursos naturales fueran optimizados para mejorar las condiciones ambientales al interior de la universidad. Dentro de este programa se creó el “Plan de control de eucaliptos”, el cual buscaba reducir la población de estos árboles, incrementar la proporción de especies vegetales nativas y permitir el restablecimiento de la comunidades y condiciones naturales de la reserva (Cano-Santana *et al.*, 2006). En 1994, con base en una estimación poblacional cercana a los 3,000 eucaliptos dentro de la REPSA, dio inicio la ejecución del plan de control y para el año 1998 su población al interior de la zona protegida se había reducido a aproximadamente 2,000 ejemplares (Segura-Burciaga, 2009).

En lo referente a la investigación científica, los estudios sobre los eucaliptos y sus efectos dentro de la REPSA, particularmente en las zonas de amortiguamiento, han sido

documentados por el Laboratorio de Interacciones y Procesos Ecológicos de la Facultad de Ciencias de la UNAM (Anexo 2). Los resultados de estas publicaciones convergen en indicar una afectación generalizada sobre la composición de las comunidades debido al establecimiento de los eucaliptos y una recuperación en sus características tras su retiro de las zonas afectadas. Por su parte, al interior de las zonas núcleo la investigación más próxima es la de Segura-Burciaga y Meave (2001), quienes monitorearon las modificaciones de los ensamblajes de plantas tras la eliminación de árboles de eucalipto. En este trabajo se discute que durante un periodo de dos años después del retiro de los ejemplares, no se presentaron cambios significativos en la estructura de las comunidades vegetales.

1.5 Los componentes bióticos de la REPSA

Las comunidades que habitan la REPSA se encuentran compuestas por una alta diversidad de formas de vida. Uno de los principales grupos taxonómicos en este sitio son las plantas. Castillo-Argüero *et al.* (2004) reportan la presencia de 337 especies de plantas vasculares en esta reserva. Entre las principales especies que contribuyen de manera sustancial a la productividad primaria neta aérea (PPNA) en este ecosistema se encuentran los arbustos *Verbesina virgata*, *Pittocaulon praecox*, *Ageratina petiolaris* y *Dodonaea viscosa*, así como los árboles *Buddleja cordata*, *B. parviflora* y *Eysehhardtia polystachya* (Cano-Santana, 1994 a, b).

Así mismo, existe un elevado número de elementos faunísticos, a saber, 37 especies de mamíferos, 106 especies de aves, cinco especies de anfibios, 20 especies de reptiles y

817 especies de artrópodos (Nava-López *et al.*, 2009; Rueda-Salazar y Cano-Santana, 2009). Por su parte, se han identificado 65 especies de hongos macro y microscópicos (Nava-López *et al.*, 2009), mientras que el grupo de las bacterias no ha sido descrito en ninguna publicación hasta ahora (REPSA, 2020).

1.6 Justificación

Debido a que los eucaliptos son árboles ajenos a la comunidad vegetal xerófila nativa de la Reserva del Pedregal de San Ángel, y dado que sus características constituyen una potencial amenaza a las interacciones bióticas y ambientales del ecosistema (Cano-Santana *et al.*, 2006; Zambrano *et al.*, 2016), este trabajo pretende ampliar los conocimientos sobre la relación entre los rasgos del suelo, la radiación incidente y las características de la comunidad vegetal que se establece debajo de los eucaliptos en comparación con algunos elementos arbóreos de esta reserva natural; un espacio que cobra particular relevancia al proveer múltiples servicios ecosistémicos y ser uno de los últimos relictos de ecosistemas naturales en el interior de una de las cinco ciudades más pobladas del mundo (Zambrano *et al.*, 2016; United Nations, 2018).

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo general de este trabajo es analizar la composición de los ensamblajes de plantas, la radiación fotosintéticamente activa incidente y los rasgos del suelo presentes bajo la copa del eucalipto *Eucalyptus camaldulensis* en comparación con lo que se registra bajo la copa de otras dos plantas nativas (el tepozán *Buddleja cordata* y el chapulixtle, *Dodonaea viscosa*) y en hábitats abiertos al interior de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Los objetivos particulares son:

1. Conocer la composición y los cambios estacionales de los ensamblajes vegetales reclutados bajo los eucaliptos en comparación con los demás hábitats.
2. Comparar la cantidad de radiación fotosintéticamente activa medida debajo de la copa de los eucaliptos con la registrada en sitios abiertos y bajo la copa de *B. cordata* y *D. viscosa*.
3. Conocer y comparar algunos de los rasgos fisicoquímicos de los suelos presentes en los sitios abiertos con las de los suelos bajo las copas de *B. cordata*, *D. viscosa* y *E. camaldulensis*.

Dados los atributos físicos de los eucaliptos y el carácter alelopático de sus metabolitos secundarios se espera que su presencia: 1) restrinja el establecimiento y la diversidad de las comunidades vegetales, 2) limite la radiación incidente y 3) modifique la cantidad de recursos del suelo.

III. MÉTODOS

3.1 Sitio de estudio

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) se localiza al interior de Ciudad Universitaria, en la alcaldía Coyoacán de la Ciudad de México (Fig. 3.1). Está ubicada entre los 19°18'21'' y 19°20'11'' norte y 99°10'15'' y 99°12'4'' oeste, a una altitud que va desde los 2,270 y hasta los 2,349 m s.n.m. y ocupa una extensión de 237.3 ha (REPSA, 2020).

El clima en esta zona es templado subhúmedo con lluvias en verano [Cb (w1) w] y exhibe una estacionalidad marcada con una época lluviosa en los meses de junio a octubre y una temporada seca de noviembre a mayo, así como una temperatura media anual de 15.6°C y una precipitación media anual de 833 mm (REPSA, 2020).

El suelo en este sitio es de tipo leptosol, presenta escasa retención de agua y bajo contenido de elementos minerales, suele ser incipiente e incluso estar ausente en algunas zonas (Siebe *et al.*, 2016; Castellanos-Vargas *et al.* 2017). El sustrato que lo soporta es una densa capa de basalto heterogéneo de coloración gris oscura originado a partir de la erupción del volcán Xitle ocurrida durante siglo IV e.c. (Siebe, 2000; Siebe *et al.*, 2016).

Presenta una vegetación de tipo matorral xerófilo, con una flora compuesta por 377 especies de plantas vasculares, de las cuales 357 son nativas y 20 son introducidas. El estrato herbáceo es la forma de crecimiento dominante en la reserva, al contar con una representación de 279 especies, por su parte, la forma de crecimiento arbustivo cuenta con 48 especies vegetales, mientras que, el grupo de plantas de porte arbóreo está conformado por sólo 10 especies (Castillo-Argüero *et al.*, 2009).

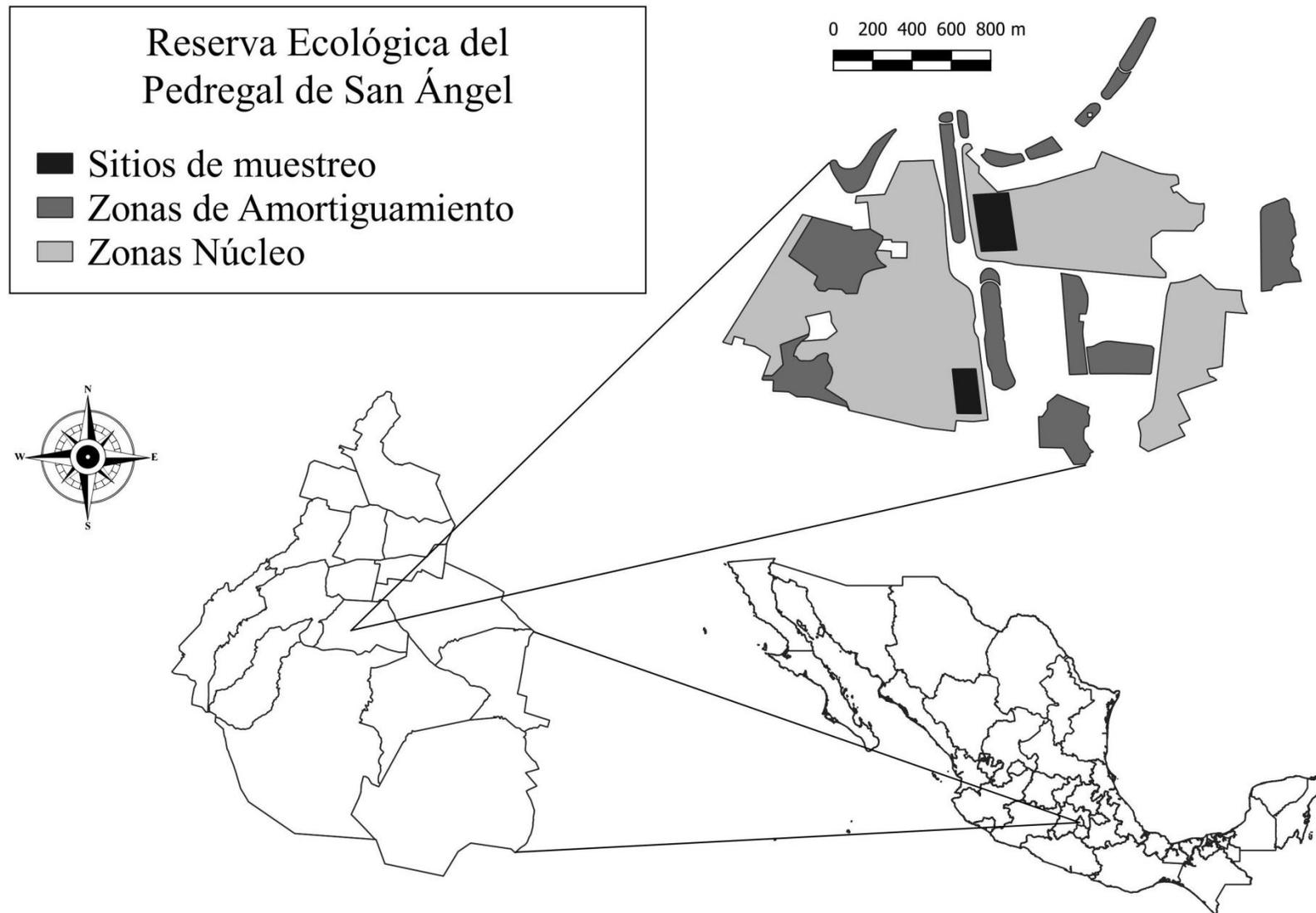


Figura 3.1 Ubicación geográfica de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel al interior de la Ciudad de México, México. Sitios de muestreo al interior de la REPSA. Modificado de De la Fuente (2005).

La REPSA es también un proveedor de servicios ecosistémicos de soporte, de regulación, de provisión y culturales para el *campus* Ciudad Universitaria de la UNAM y para la Ciudad de México, ya que brinda recursos y genera condiciones que repercuten en el mejoramiento de la calidad de vida y el bienestar de los habitantes de la capital del país (Nava-López *et al.*, 2009).

3.2 Especies estudiadas

Se seleccionaron y georreferenciaron 15 ejemplares de cada una de las siguientes especies: *Eucalyptus camaldulensis*, *Buddleja cordata* y *Dodonaea viscosa*, así como 15 zonas abiertas sin la presencia de estos elementos vegetales (10 al interior de la zona núcleo oriente (ZNO) y 5 más en las zona núcleo poniente (ZNP). Los ejemplares seleccionados y las zonas abiertas mantuvieron una distancia de al menos 30 m entre sí y hacia los bordes de la ZNO y ZNP de la REPSA.

Eucalyptus camaldulensis Dehnh (Myrtaceae) es una especie de crecimiento arbóreo que puede alcanzar tallas de hasta 40 m de altura; corteza lisa color blanca, gris, marrón y roja; hojas ovadas a lanceoladas, pecioladas, acuminadas de color verde o verde grisáceo; umbelas de 7 a 11 flores color blanco a crema; frutos pedicelados, capsulares, de entre 2 y 5 mm de largo y entre 0.4 y 1cm de ancho (Slee, 2015; Fig. 3.2a).

Esta especie fue introducida a Ciudad Universitaria, a partir de plantaciones en las laterales de las vías de comunicación principales del *campus*, y al ser una especie ajena a la comunidad vegetal nativa representa un riesgo potencial para el ecosistema (Segura-Burciaga y Meave, 2001; Zambrano *et al.*, 2016).

Por otra parte, *Buddleja cordata* Kunth (Scrophulariaceae), conocida comúnmente como “tepozán”, es una planta arbórea o arbustiva de 1 a 20 m de altura; hojas lanceoladas, oblongas, ovadas o elípticas con venación muy prominente y pubescencia densa en el envés; inflorescencia en grandes panículas terminales con flores color blanco amarillentas; frutos capsulares, ovoide-elipsoides, de 6 mm de largo por 1.5 a 4 mm de diámetro (Rzedowski y Rzedowski, 2005; EOL, 2020a; Fig. 3.2b).

El tepozán, forma parte de la comunidad vegetal nativa y es uno de los principales contribuyentes a la PPNA de la REPSA, aportando $69.1 \text{ gm}^{-2} \text{ año}^{-1}$, es decir el 10.9% del total (Cano-Santana, 1994a, b).

Finalmente, *Dodonaea viscosa* (L.) Jacquin (Sapindaceae), cuyo nombre común es “chapulixtle”, es una planta de crecimiento arbustivo que presenta tallas de hasta 5 m de alto; tronco y ramas resinosas; hojas alternas, lanceoladas, sésiles, resinosas; flores unisexuales amarillentas de 2 a 5 pétalos; fruto samaroide, trialado, trilocular, glabro, de 1.5 a 2.5 cm de ancho (Rzedowski y Rzedowski, 2005; EOL, 2020b; Fig. 3.2c).

El chapulixtle, también es una especie nativa y contribuye con $14.0 \text{ gm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a la PPNA de la REPSA, lo que constituye el 2.2% del total (Cano-Santana, 1994a, b).

A lo largo de este trabajo al entorno compuesto por los ensamblajes de plantas y los componentes abióticos localizados bajo la copa de cada especie seleccionada se le denominará microcosmos y, aunque las zonas abiertas no lo son, por economía de lenguaje también se les denominará así. No obstante, a estas áreas de influencia también se les podrá denominar hábitats o tipos de sitio.



Figura 3.2. Ejemplar y detalle de hoja, flor y fruto de a) *Eucalyptus camaldulensis*, b) *Buddleja cordata* y c) *Dodonaea viscosa* al interior de la REPSA. Fotografías: Jesús Morelos Rebollar.

3.3 Muestreo de la vegetación

Se realizaron dos muestreos; el primero durante la temporada de lluvias (en los meses de agosto a noviembre de 2020) y el segundo en la época de secas (marzo a mayo de 2021).

Se realizó un muestreo de la comunidad de plantas de los estratos herbáceos y arbustivos que se localizan bajo la copa de cada una de las especies vegetales seleccionadas (15 eucaliptos, 15 chapulixtles y 15 tepozanes), así como en los 15 sitios sin cobertura. Las plantas muestreadas deberían estar dentro de un radio de 2 m respecto al tronco de cada ejemplar seleccionado de las tres especies elegidas, así como en un diámetro de 4 m en las zonas abiertas; esto para homogeneizar el área muestreada. A cada planta se le calculó su cobertura (C) con base en la medición del diámetro mayor y menor, empleando la siguiente fórmula:

$$C = \pi ((D + d) / 4)^2$$

donde:

D = diámetro mayor y d = diámetro menor (Ramírez-González, 2006).

Para la determinación taxonómica de las especies vegetales registradas en campo se empleó la publicación de Castillo-Argüero *et al.* (2007). Así mismo, la nomenclatura del inventario botánico se elaboró con base en Villaseñor (2016).

3.4 Radiación fotosintéticamente activa

Se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA; 400 a 700 nm) bajo la copa de 15 eucaliptos, 15 chapulixtles y 15 tepozanes, así como en los 15 sitios sin cobertura mediante el uso de un sensor cuántico (PHOTOBIO LGBQM2). Las mediciones se realizaron en condiciones de cielo despejado entre las 12:00 y las 14:00 h en mayo de 2021. Para cada especie se realizó la lectura bajo la copa de cada ejemplar a la altura del pecho (1.3 m) en los cuatro puntos cardinales a una distancia de 0.5 m del tronco así como del centro de los sitios sin cobertura.

3.5 Suelo

Durante abril de 2021 se realizó la colecta de muestras de suelo. Para ello, se seleccionaron tres sitios de colecta por cada uno de los cuatro hábitats localizados al interior de la ZNO. Dentro del área de 2 m de radio en cada especie y el diámetro de 4 m en las zonas abiertas se aleatorizó el punto de colecta. En un área de 10 cm de radio se retiró el mantillo y con el apoyo de una pala se colectó la muestra de suelo a una profundidad de entre 1 y 3 cm. Las muestras se colocaron en bolsas de plástico selladas herméticamente y se almacenaron hasta el análisis de laboratorio.

Una vez obtenidas las muestras, fueron enviadas a las instalaciones del Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC) donde se obtuvieron los datos sobre los siguientes rasgos del suelo: composición elemental (carbono (C), nitrógeno (N) y azufre (S)), así como la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de humedad, el pH y los polifenoles presentes.

◇ Determinación de composición elemental

Para determinar el contenido total de carbono (C), nitrógeno (N) y azufre (S) presentes en el suelo se utilizó la técnica de espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Se colocó una muestra de suelo de 10g de peso en una estufa a 80°C durante 48h para eliminar la humedad presente. Después, se molió y tamizó hasta alcanzar un tamaño de partícula de una malla No.50 (200µm). Posteriormente, se colocó un 1 mg de la muestra dentro de reactivales para procesarse en un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente iCE 3000 (Thermo Fisher Scientific, EE.UU.) con base en las instrucciones del fabricante. La determinación elemental se realizó por duplicado para controlar la calidad de los resultados.

◇ Conductividad eléctrica (CE)

La medición de la conductividad eléctrica en el suelo se realizó a través del procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). En un vaso de vidrio se mezclaron 10 g de suelo con 20 ml de agua y con un multimedidor portátil sensION-156 (Hach, EE.UU.) se registró el valor de CE cuando la lectura se estabilizó. Los valores de CE se midieron por triplicado para controlar la calidad de los resultados.

◇ Determinación de humedad

El contenido de humedad se determinó a través del procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Se colocó una muestra de suelo de 10 g de peso en una termobalanza M40 (Sartorius Lab Instrument, Alemania) a

120 °C de temperatura hasta obtener un peso constante. El porcentaje de humedad se midió por triplicado para controlar la calidad de los resultados.

◇ pH

La determinación de pH en el suelo se realizó a través del procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). En un vaso de vidrio se mezclaron 10 g de suelo con 20 ml de agua destilada, y con un multimedidor portátil sensION-156 (Hach, EE.UU.) se registró el nivel de acidez cuando la lectura se estabilizó. La medición de pH se realizó por triplicado para controlar la calidad de los resultados.

◇ Polifenoles totales

Los polifenoles totales en el suelo se determinaron siguiendo el procedimiento de Martínez-Cruz y Paredes-López (2014). Se llevó a cabo una extracción con metanol al 70% a partir de una muestra de suelo de 0.5 g de peso. Los polifenoles se cuantificaron a través del método colorimétrico Folin-Ciocalteu, mediante un espectrofotómetro de microplacas Multiskan SkyHigh (Thermo Fisher Scientific, EE.UU). Se utilizó una λ de 760 nm y ácido gálico como patrón, las concentraciones de polifenoles totales se expresaron como: mg ácido gálico/ g muestra peso seco. La cuantificación de polifenoles se realizó por triplicado para controlar la calidad de los resultados.

3.6 Análisis de datos

3.6.1 Muestreos de la vegetación

Para conocer si había un efecto del hábitat y de la temporada sobre la riqueza específica de plantas se realizó una prueba de Kruskal-Wallis, y de presentarse un efecto significativo, se realizó una prueba post-hoc de Dunn. Para realizar los análisis estadísticos se usó el programa SPSS versión 20.0 (IBM, 2011).

Por otro lado, a partir de los registros de abundancia de cada uno de los ensamblajes, se construyó una curva de acumulación de especies para cada sitio por temporada, para evaluar el esfuerzo de muestreo en cada tratamiento a través del cálculo de los estimadores no paramétricos Chao 1 y ACE. Las estimaciones fueron realizadas con el programa EstimateS versión 9.1.0 (Colwell, 2013).

Por su parte, para verificar si existían diferencias en la cobertura relativa de las cinco especies dominantes entre los cuatro hábitats en dos temporadas se realizó un análisis de varianza de dos vías, previa transformación arcoseno de los datos. En caso de presentarse un efecto significativo se aplicó una prueba *post-hoc* de Tukey. Para realizar los análisis estadísticos se usó el programa SPSS versión 20.0 (IBM, 2011).

Adicionalmente, con base en los listados de Castillo-Argüero *et al.* (2009) y REPSA (2020), se realizó una clasificación de las especies censadas en tres categorías: nativas arvenses (NA), nativas no arvenses (NnA) y exóticas (E). Para conocer si existían diferencias en la cobertura relativa de estos tres tipos de especies entre hábitats en dos estaciones se realizó un análisis de varianza de dos vías, previa transformación arcoseno de

los datos. De presentarse un efecto significativo se aplicó una prueba *post-hoc* de Tukey. Los análisis se realizaron con el programa SPSS versión 20.0 (IBM, 2011).

Así mismo, con base en la abundancia relativa de las especies de los cuatro tratamientos, se calculó el índice de Shannon-Wiener (H' , usando \ln), para conocer la diversidad de la vegetación que se aloja en las zonas abiertas y bajo las copas de las especies nativas y los eucaliptos. Posteriormente, los valores promedio de cada hábitat fueron analizados mediante la prueba “de t” de Hutcheson (1970; Zar, 2014) para detectar si la diversidad de los ensamblajes vegetales eran significativamente distintos entre sí. Para la obtención del índice de Shannon-Wiener se empleó el programa PAST versión 4.07 (Hammer *et al.*, 2001).

Igualmente, se calculó el índice de dominancia de Simpson (D) con base en la abundancia relativa de las especies, para identificar el grado de dominancia que se presenta al interior de los ensamblajes de plantas en los cuatro hábitats. El índice de Simpson se calculó con el uso del programa PAST versión 4.07 (Hammer *et al.*, 2001).

Con el propósito de conocer las semejanzas entre los ensamblajes vegetales de los cuatro microcosmos en ambas temporadas, se calculó el índice de Jaccard (J) y, a partir de los resultados se construyó un dendrograma por el método de agrupación UPGMA para visualizar gráficamente las afinidades encontradas entre los microcosmos en ambas temporadas. Para el cálculo del índice de Jaccard y la construcción del dendrograma se utilizó el programa PAST versión 4.07 (Hammer *et al.*, 2001).

Por último, se realizó un análisis componentes principales (ACP) con base en la matriz de abundancia de las especies vegetales censadas y utilizando la matriz de

correlación, para obtener un ordenamiento espacio-temporal de los cuatro ensamblajes estudiados durante los muestreos correspondientes al periodo 2020-2021. Esto mediante el programa PAST versión 4.07 (Hammer *et al.*, 2001).

3.6.2 Radiación fotosintéticamente activa

Para conocer el efecto del sitio de muestreo sobre la RFA incidente se hizo un análisis de varianza de una vía. De haber un efecto significativo se aplicó una prueba *post-hoc* de Tukey. Para realizar los análisis se utilizó el programa SPSS versión 20.0 (IBM, 2011).

3.6.3 Suelo

Para analizar el efecto del sitio de colecta sobre los rasgos del suelo (pH, conductividad eléctrica (CE), porcentaje de humedad, contenido de nitrógeno (N), carbono (C), azufre (S) y polifenoles), se emplearon análisis de varianza de una vía. De presentarse un efecto significativo se aplicó una prueba *post-hoc* de Tukey. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con el software SPSS versión 20.0 (IBM, 2011).

3.6.4 Análisis integrado

Con base en las matrices de variables bióticas y abióticas de los cuatro tratamientos, se realizó un Análisis Canónico de Correspondencia (ACC), para estimar la relación entre los rasgos de suelo y RFA con los ensamblajes vegetales presentes en cada microcosmos al interior del ecosistema. El análisis multivariado fue realizado con el programa PAST versión 4.07 (Hammer *et al.*, 2001).

IV. RESULTADOS

4.1 Los ensamblajes vegetales de los microcosmos

Se registró un total de 78 especies asociadas a los cuatro microcosmos (Anexo 3). No se encontró un efecto significativo de los hábitats sobre la riqueza promedio de plantas (prueba de Kruskal-Wallis: $H=91.424$, $g.l.=7$, $P<0.01$), pero sí entre temporadas (pruebas de Dunn: $P<0.01$), pues se encontró que la riqueza fue 2.9 veces más alta en lluvias (9.8-12.5 especies por hábitat) que en secas (3.67-4.13 especies por hábitat; Fig. 4.1).

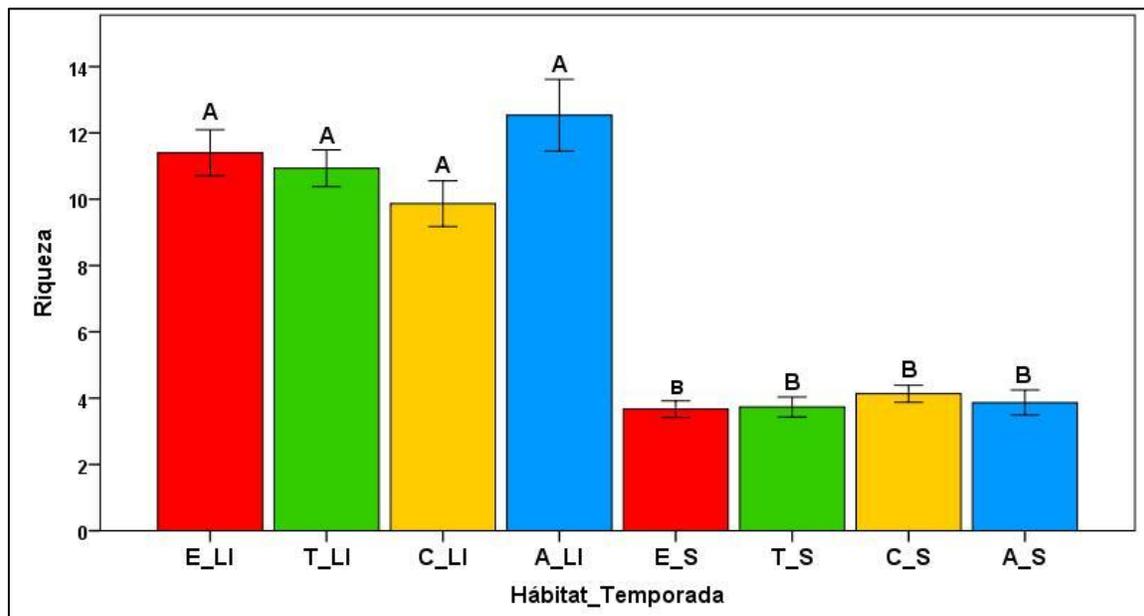


Figura 4.1. Variación entre hábitats y fecha de muestreo en la riqueza promedio de especies (\pm error estándar). E (*Eucalyptus camaldulensis*), T (*Buddleja cordata*), C (*Dodonaea viscosa*) y A (Zona abierta); Ll (lluvias) y S (secas). Letras distintas representan diferencias significativas con $P < 0.01$ (pruebas de Dunn).

Las curvas de acumulación de especies basadas en los estimadores no paramétricos Chao 1 y ACE para cada ensamblaje en lluvias y secas se presentan en las Figuras 4.2 y

4.3, respectivamente. La riqueza de especies observada por microcosmos en la temporada de lluvias guarda la siguiente relación abierto > *E. camaldulensis* > *B. cordata* = *D. viscosa*. Estos muestran una completitud de entre 65.3 y 95.8%, de modo que la riqueza calculada por los estimadores presenta ésta relación: eucalipto (86-92 especies) > abierto (73-74) > chapulixtle (59-60) > tepozán (53-54) (Tabla 4.1).

En secas la riqueza de especies es menor que en lluvias, y prácticamente la misma entre microcosmos (11 a 13 especies), que representan una completitud de entre 31.8 y 97.7%. Con base en la riqueza calculada por los estimadores, los microcosmos presentan la siguiente relación: abiertos (41 especies) > chapulixtle (13-15) = tepozán (13) = eucalipto (11) (Tabla 4.1).

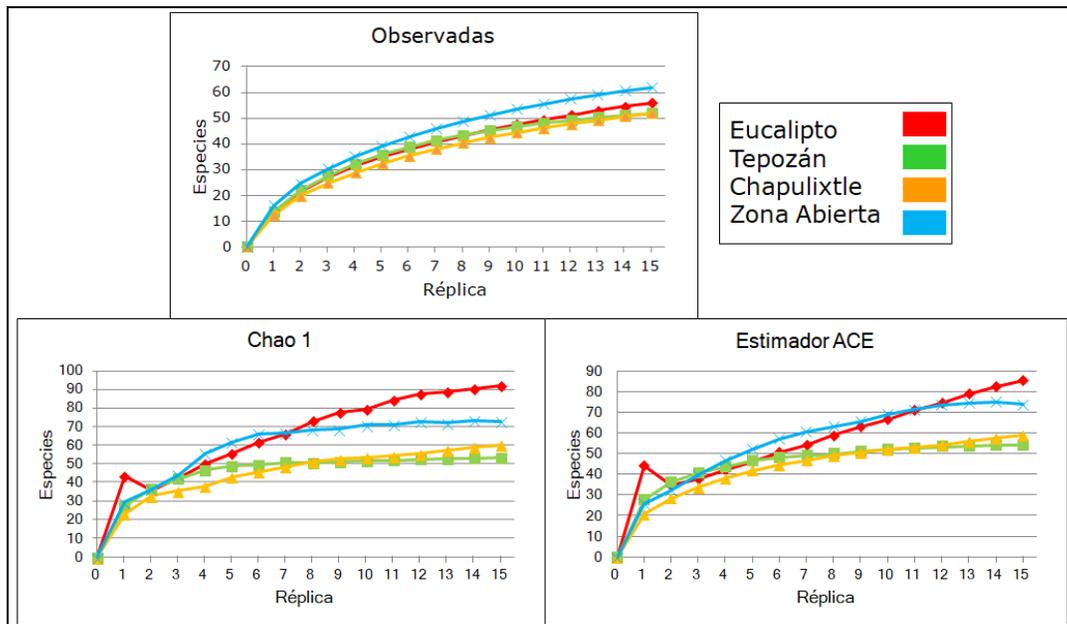


Figura 4.2. Curvas de acumulación de la riqueza de plantas observada y calculada por los estimadores Chao 1 y ACE de los ensamblajes asociados a los 4 tipos de microcosmos en la REPSA durante la temporada de lluvias (junio-octubre) de 2020.

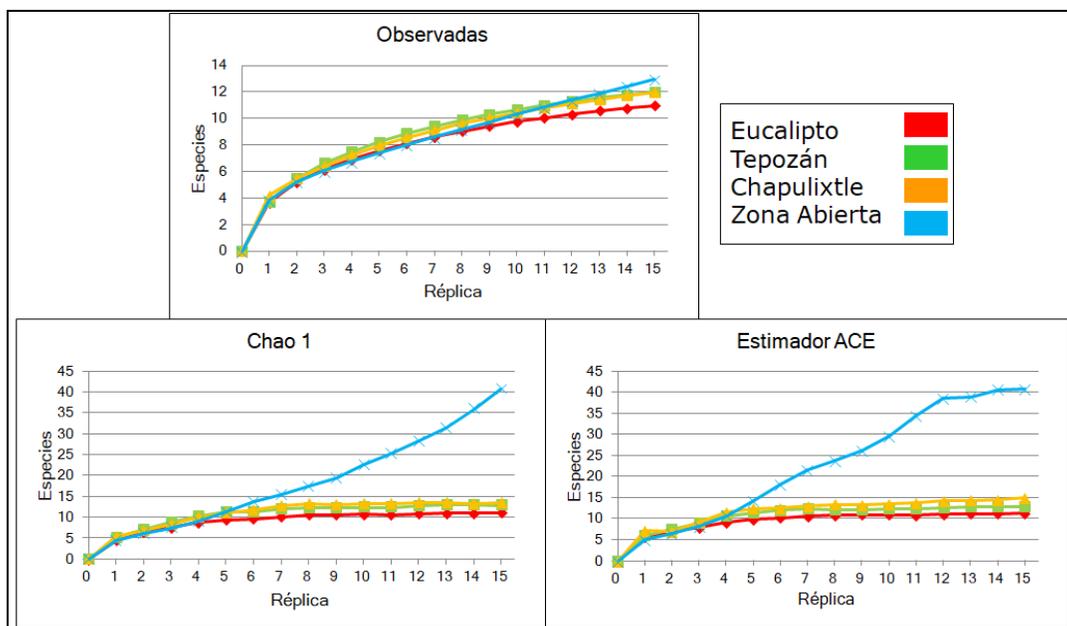


Figura 4.3. Curvas de acumulación de la riqueza de plantas observada y calculada por los estimadores Chao 1 y ACE de los ensamblajes asociados a los 4 tipos de microcosmos en la REPSA durante la temporada de secas (noviembre-mayo) de 2021.

Tabla 4.1. Riqueza de especies vegetales observada y calculada por los estimadores ACE y Chao 1 y valores de completitud de los ensamblajes asociados a los cuatro tipos de microcosmos en la REPSA durante dos temporadas. El significado de los símbolos se señala en la Fig. 4.1.

Sitio	Especies observadas	ACE	Completitud (%)	Chao 1	Completitud (%)
E_Ll	56	85.6	65.3	92.0	60.8
E_S	11	11.4	96.4	11.2	97.7
T_Ll	52	54.2	95.8	53.3	97.3
T_S	12	13.0	92.3	12.9	92.3
C_Ll	52	59.0	88.0	60.3	86.1
C_S	12	15.0	79.9	13.4	88.9
A_Ll	62	74.0	83.7	72.8	85.0
A_S	13	40.8	31.8	40.8	31.8

Durante la época de lluvias la composición de las comunidades vegetales bajo de la copa de los eucaliptos presentó una mayor cobertura relativa de *Pittocaulon praecox* (20.23%), en segundo lugar *Dahlia coccinea* (13.11%) y en tercera posición *Manfreda scabra* (12.04%), mientras que en la temporada de secas la especie con mayor cobertura

relativa fue nuevamente *P. praecox* (37.58%), seguido del complejo *Opuntia* spp. (*O. tomentosa* + *O. lasiacantha*) con 24.57% y en tercer lugar *Muhlenbergia robusta* con 13.96% (Fig. 4.4).

Por su parte, en los ensamblajes bajo de la copa de los tepozanes durante la temporada de lluvias dominaron *D. coccinea* (18.33%), *Opuntia* spp. (17.99%) y *Buddleja sessiliflora* (15.05%); en contraparte, durante la época de secas, las especies dominantes fueron *Opuntia* spp. (33.72%), *P. praecox* (25.64%) y *M. robusta* (11.33%; Fig. 4.4).

Por otro lado, las plantas que tuvieron mayor cobertura relativa bajo los chapulixtes en la estación lluviosa fueron: *Opuntia* spp. (28.84%), *M. robusta* (15.00%) y *Ageratina petiolaris* (14.04%), mientras que en secas dominaron *Opuntia* spp. (50.20%), *M. robusta* (16.53%) y *Agave salmiana* (13.09%; Fig. 4.4).

Finalmente, en las zonas abiertas durante la época de lluvias dominaron *Opuntia* spp. (32.13%), *M. robusta* (20.88%) y *Melinis repens* (9.85%), en tanto que, en la temporada de secas las plantas dominantes fueron: *Opuntia* spp. (57.63%), *M. robusta* (32.30%) y *P. praecox* (3.23%; Fig. 4.4).

Por otra parte, de las cinco especies dominantes, no se encontraron efectos significativos entre hábitats o temporadas ni en la interacción de ambos factores sobre las coberturas de *A. salmiana*, *A. petiolaris* y *P. praecox* (Tabla 4.2abe).

Se presentaron diferencias significativas entre hábitats ($F_{3,112} = 5.260$, $P=0.002$) y entre temporadas ($F_{1,112} = 4.934$, $P=0.028$) pero no en la interacción hábitat-temporada ($F_{3,112} = 0.103$, $P=0.958$) sobre la cobertura de *M. robusta* (Tabla 4.2c). Se observó que la

cobertura de *M. robusta* en ambas temporadas fue mayor en las zonas abiertas (20.8 y 32.3%) que en el resto de los hábitats (4.8 y 16.5%; Fig. 4.4).

Por su parte, también se presentaron diferencias significativas entre hábitats ($F_{3,112}=6.027$, $P=0.001$) y entre temporadas ($F_{1,112}=26.922$, $P=0.000$) pero no en la interacción hábitat-temporada ($F_{3,112}=0.028$, $P=0.994$) sobre la cobertura del complejo *Opuntia* spp. (Tabla 4.2d). Se observó que la cobertura de *Opuntia* spp. en lluvias y secas fue significativamente menor en los eucaliptos (8.7 y 26.6%) que en los demás hábitats (17.9 y 57.6%; Fig. 4.4).

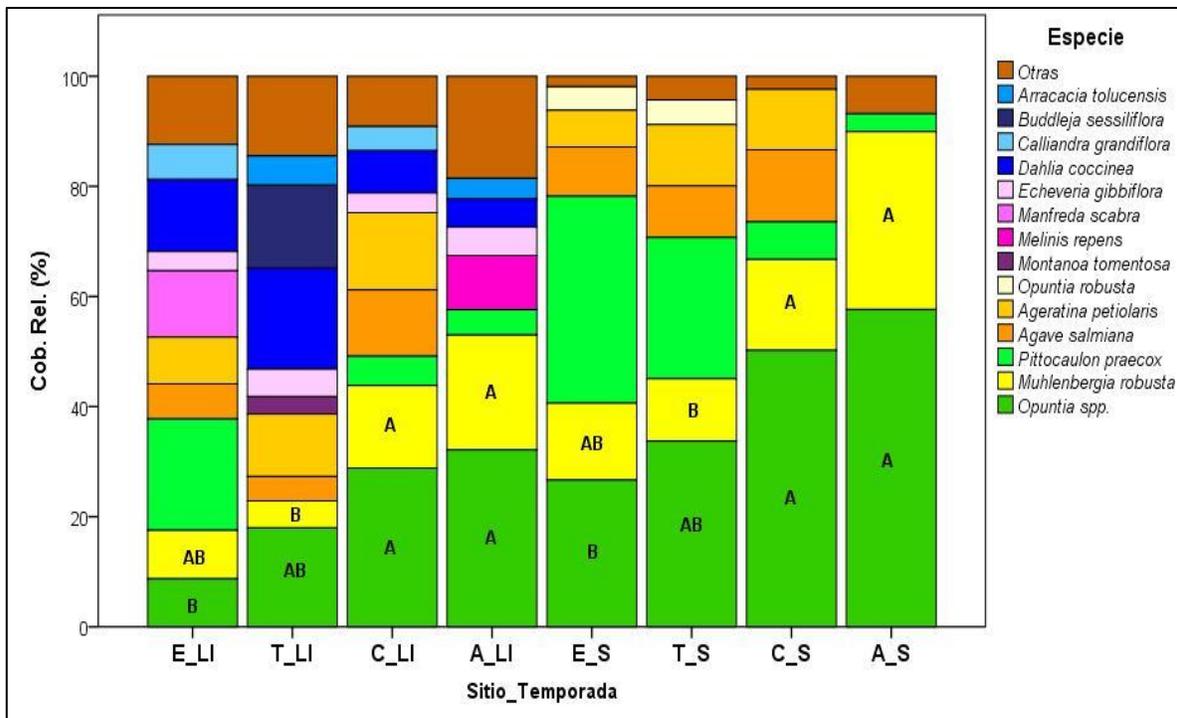


Figura 4.4. Cobertura relativa de cada especie vegetal en cada microcosmos en la REPSA y época de muestreo. El significado de los símbolos se señala en la Fig. 4.1. La categoría “Otras” agrupa a las especies con un porcentaje de cobertura menor al 3%. Letras diferentes dentro de las barras de color de *M. robusta* y *Opuntia* spp. denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

Tabla 4.2. Análisis de varianza para determinar el efecto de los microcosmos y las temporadas de muestreo sobre la cobertura de las cinco especies dominantes a) *A. salmiana*, b) *A. petiolaris*, c) *M. robusta*, d) *Opuntia* spp. y e) *P. praecox*.

a) *A. salmiana*

Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	0.290	3	0.097	1.910	0.132
Temporada	0.030	1	0.030	0.588	0.445
Hábitat * Temporada	0.031	3	0.010	0.206	0.892
Error	5.671	112	0.051		

b) *A. petiolaris*

Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	0.430	3	0.143	1.717	0.168
Temporada	0.000	1	0.000	0.006	0.939
Hábitat * Temporada	0.043	3	0.014	0.170	0.916
Error	9.360	112	0.084		

c) *M. robusta*

Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	1.353	3	0.451	5.260	0.002
Temporada	0.423	1	0.423	4.934	0.028
Hábitat * Temporada	0.027	3	0.009	0.103	0.958
Error	9.605	112	0.086		

d) *Opuntia* spp.

Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	2.043	3	0.681	6.027	0.001
Temporada	3.041	1	3.041	26.922	<0.001
Hábitat * Temporada	0.009	3	0.003	0.028	0.994
Error	12.652	112	0.113		

e) *P. praecox*

Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	0.669	3	0.223	2.332	0.078
Temporada	0.083	1	0.083	0.867	0.354
Hábitat * Temporada	0.168	3	0.056	0.587	0.625
Error	10.713	112	.096		

Las especies nativas (arvenses y no arvenses) en todos los microcosmos representaron más del 90% de la cobertura relativa registrada (Fig. 4.5). En particular, se presentaron diferencias significativas entre hábitats ($F_{3,112}= 9.215$, $P<0.001$), entre temporadas ($F_{1,112}= 148.096$, $P<0.001$) y en la interacción hábitat-temporada ($F_{3,112}= 3.968$, $P=0.010$) sobre la cobertura de las especies nativas arvenses (Tabla 4.3b). Se observó que la cobertura de las especies nativas arvenses fue mayor bajo los tepozanes (47.31 y 1.22% en lluvias y secas respectivamente) que en los demás hábitats (Fig. 4.5).

De igual forma, la cobertura de las especies nativas no arvenses presentó diferencias significativas entre hábitats ($F_{3,112}= 6.304$, $P=0.001$), entre temporadas ($F_{1,112}= 148.783$, $P<0.001$) y en la interacción hábitat-temporada ($F_{3,112}= 2.989$, $P=0.034$; Tabla 4.3c). Se observó que la cobertura de éstas especies fue menor bajo los tepozanes (52.2 y 97.4%) en comparación con el resto de los hábitats (Fig. 4.5).

Finalmente, la representatividad de las especies exóticas en todos los hábitats fue muy baja, tanto en lluvias (0.43-10%) como en secas (0-1.22%; Fig. 4.5). Se presentaron diferencias significativas entre hábitats ($F_{3,112}= 4.268$, $P=0.007$) y entre temporadas ($F_{1,112}= 9.650$, $P=0.002$) pero no en la interacción hábitat-temporada ($F_{3,112}= 0.814$, $P=0.489$) sobre la cobertura de las especies exóticas (Tabla 4.3a). Se observó que la cobertura de las especies exóticas fue mayor en las zonas abiertas (9.8 y 1.22%) que en los demás hábitats (Fig. 4.5).

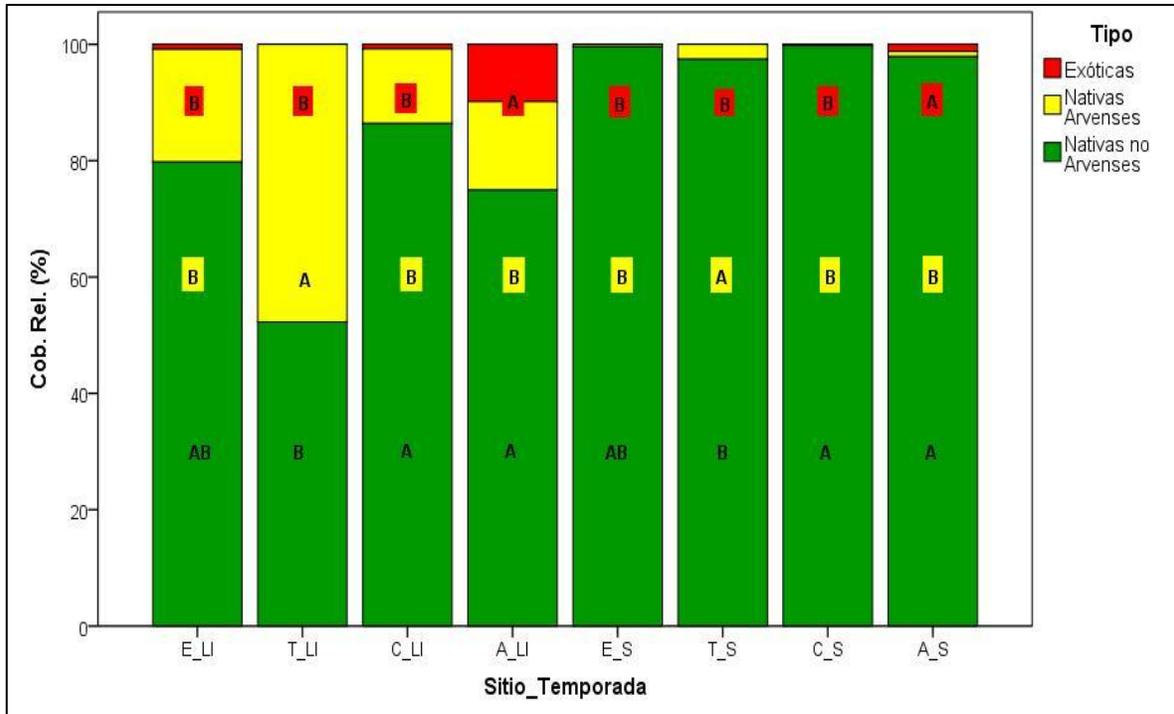


Figura 4.5 Cobertura relativa de cada tipo de plantas de acuerdo a la clasificación: exóticas, nativas arvenses y nativas no arvenses. El significado de los símbolos se encuentra al pie de la figura 4.1. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

Se reportaron valores más altos en los índices de diversidad de Shannon en la época de lluvias que en secas, y se encontraron diferencias significativas entre estas temporadas; en particular, durante la temporada de lluvias se encontraron diferencias significativas entre microcosmos, pues el valor de H' fue significativamente más alto en los ensamblajes asociados a las zonas abiertas que bajo los tepozanes (Tabla 4.4).

Por otra parte, se registró que los índices de dominancia de Simpson (D) tuvieron valores más altos en la temporada de secas que en lluvias. El valor más alto de dominancia se alcanzó bajo los tepozanes en lluvias, y bajo los chapulixtles en secas (Tabla 4.5).

Tabla 4.3. Análisis de varianza para determinar el efecto de los microcosmos y las temporadas de muestreo sobre la cobertura de las especies a) exóticas, b) nativas arvenses y c) nativas no arvenses.

a) exóticas					
Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	0.164	3	0.055	4.268	0.007
Temporada	0.124	1	0.124	9.650	0.002
Hábitat * Temporada	0.031	3	0.010	0.814	0.489
Error	1.434	112	0.013		

b) nativas arvenses					
Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	1.068	3	0.356	9.215	<0.001
Temporada	5.722	1	5.722	148.096	<0.001
Hábitat * Temporada	0.460	3	0.153	3.968	0.010
Error	4.327	112	0.039		

c) nativas no arvenses					
Origen	S.C.	g.l.	M.C.	F	P
Hábitat	0.819	3	0.273	6.304	0.001
Temporada	6.444	1	6.444	148.783	<0.001
Hábitat * Temporada	0.388	3	0.129	2.989	0.034
Error	4.851	112	0.043		

Tabla 4.4. Valores promedio del índice de Shannon-Wiener (H' ; ln) de los ensamblajes de plantas en los cuatro tipos de microcosmos y en ambas temporadas. Letras diferentes denotan diferencias significativas. Prueba de t ($p < 0.05$) a través del procedimiento propuesto por Hutcheson, 1970.

Temporada/Sitio	Eucalipto	Tepozán	Chapulixtle	Zonas Abiertas
Lluvias, 2020	2.780 ^{ab}	2.709 ^b	3.139 ^a	3.161 ^a
Secas, 2021	1.828 ^c	1.921 ^c	1.667 ^c	1.664 ^c

Tabla 4.5. Valores del índice de Simpson (D) de los ensamblajes de plantas en los cuatro microcosmos y en dos temporadas de muestreo.

Temporada/Sitio	Eucalipto	Tepozán	Chapulixtle	Zonas Abiertas
Lluvias, 2020	0.122	0.137	0.070	0.063
Secas, 2021	0.210	0.197	0.240	0.236

El dendrograma basado en el índice de Jaccard muestra que al corte de 0.45 de similitud, se forman dos grupos: uno conformado por las comunidades muestreadas en lluvias y otro por las correspondientes a la época de secas (Fig. 4.6).

Con base en el análisis de componentes principales, se obtuvo un ordenamiento que explica el 14.17% de la varianza con la suma de los componentes principales uno (CP1, 8.42%) y dos (CP2, 5.75%). Este ordenamiento no mostró algún agrupamiento distinguible entre los ensamblajes promediados de los muestreos realizados (Fig. 4.7).

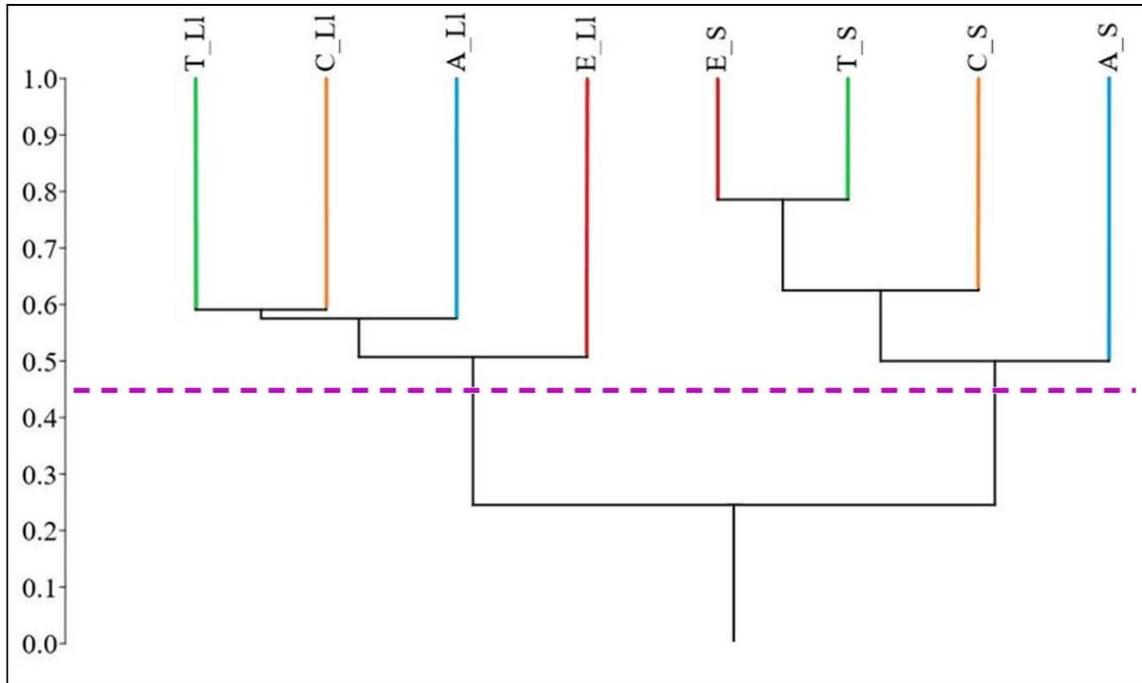


Figura 4.6. Dendrograma de las comunidades vegetales muestreadas en cuatro tipos de microcosmos en dos temporadas, que presenta las relaciones de similitud basadas en el índice de similitud de Jaccard. El significado de los símbolos se señala en la Fig. 4.1.

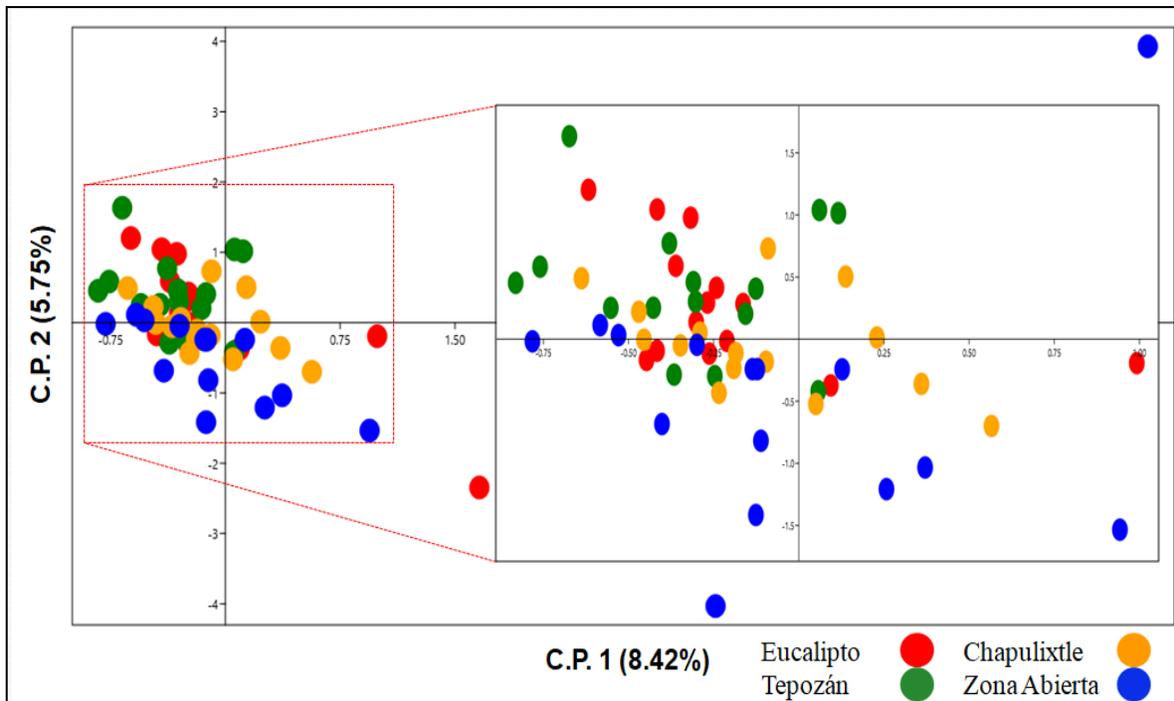


Figura 4.7. Análisis de componentes principales de los ensamblajes de las comunidades vegetales muestreadas en cuatro microcosmos en dos temporadas. El recuadro negro amplía la imagen de distribución de puntos en el cuadro rojo.

4.2 Radiación fotosintéticamente activa

Se presentó un efecto significativo del microcosmos sobre la RFA incidente ($F_{3,56}= 26.310$, $P<0.001$). Este parámetro fue, de manera lógica significativamente más alto en las zonas abiertas ($1,962 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que bajo la copa de los ejemplares de los eucaliptos, tepozanes y chapulixtles ($1,112$ - $1,368 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Fig. 4.8). Bajo la copa de las tres especies seleccionadas la RFA se reduce en un valor promedio de 38%.

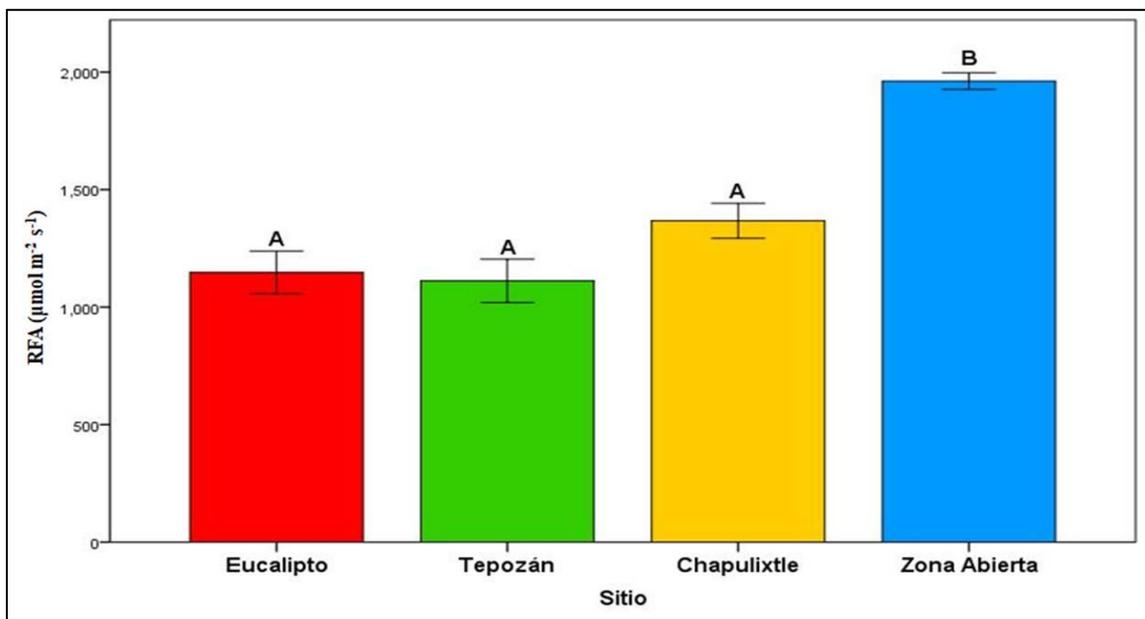


Figura 4.8. Radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm \text{e.e.}$) que incide en los cuatro hábitats de la REPSA. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey). Valores promedio de 15 réplicas.

4.3 Rasgos del suelo

No hubo diferencias significativas entre tipos de microcosmos en los valores de pH ($F_{3,8}= 2.081$, $P=0.181$), conductividad eléctrica ($F_{3,8}= 0.770$, $P=0.542$), porcentaje de humedad ($F_{3,8}= 0.708$, $P=0.574$), contenido de C ($F_{3,8}= 2.519$, $P=0.132$) y N ($F_{3,8}= 2.096$, $P=0.179$) en el suelo.

Por otra parte, se encontró un efecto significativo del tipo de microcosmos sobre el cociente C:N ($F_{3,8}=7.818$, $P=0.009$), el cual fue significativamente más alto en el suelo bajo tepozanes (14.51) que en las zonas abiertas (9.08; Fig. 4.14).

También hubo diferencias significativas entre microcosmos en el contenido de S en el suelo ($F_{3,8}= 5.953$, $P=0.020$) en el suelo. El contenido de S fue significativamente más alto bajo los tepozanes (0.20%) que en el resto de los microcosmos (0.03-0.05%; Fig. 4.15).

No se encontraron diferencias significativas entre tipos de microcosmos entre el contenido de polifenoles totales ($F_{3,8}= 1.450$, $P=0.299$) en el suelo. Los valores variaron entre 0.0039 (en las zonas abiertas) y 0.0283 mg ácido gálico/g de muestra (bajo la copa de los chapulixtles; Fig. 4.16).

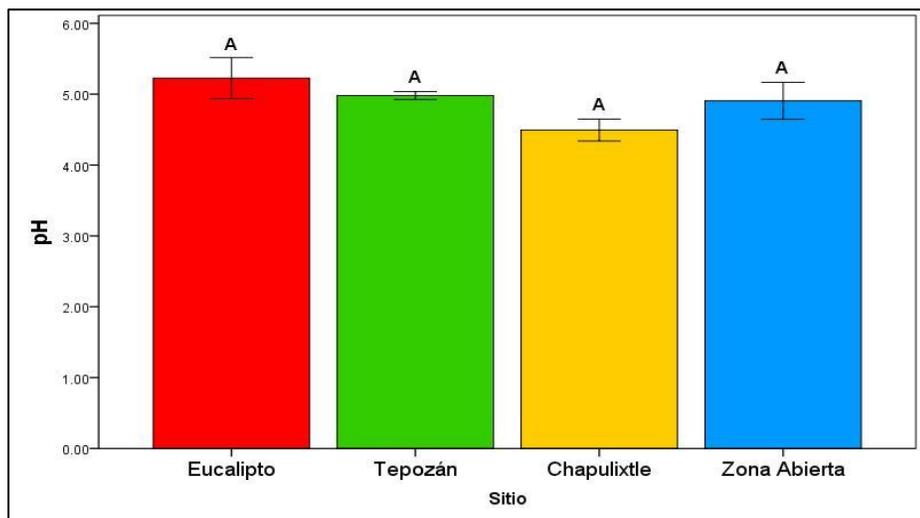


Figura 4.9. Valores de pH del suelo (\pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANdeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

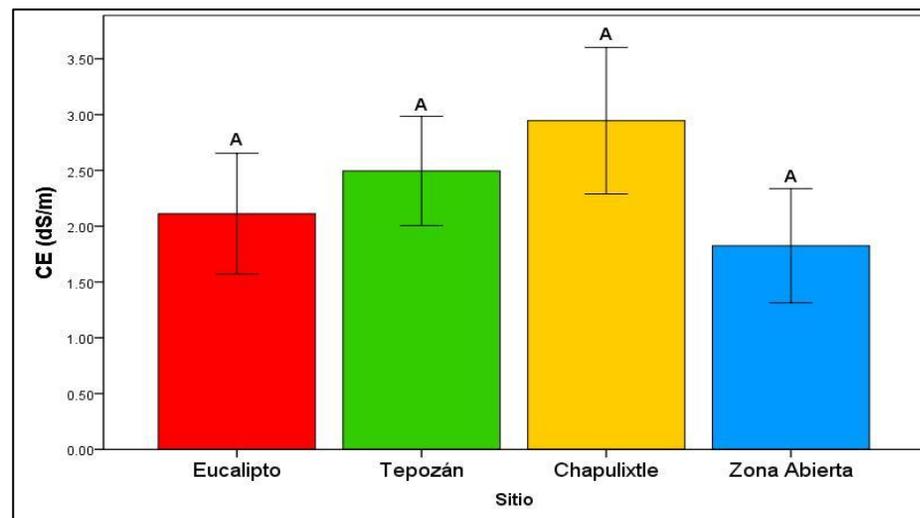


Figura 4.10. Conductividad eléctrica del suelo (\pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANdeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

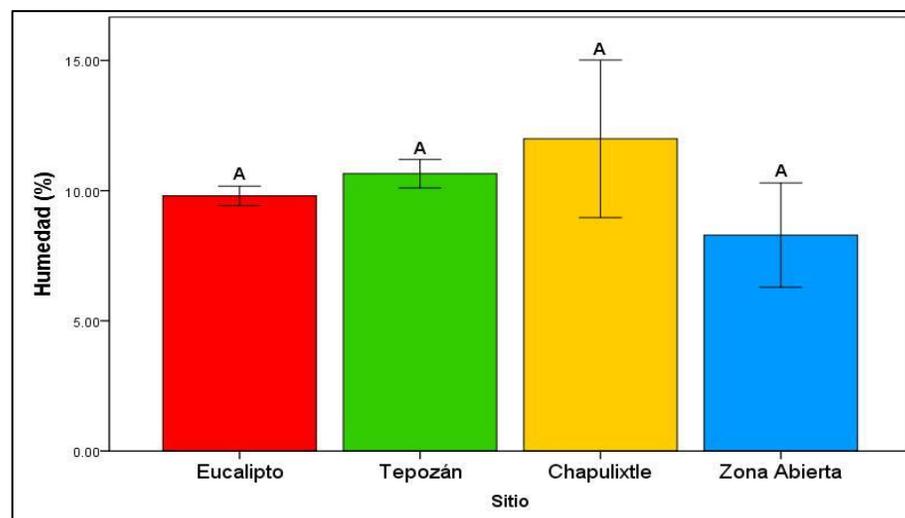


Figura 4.11. Humedad del suelo (\pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANdeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

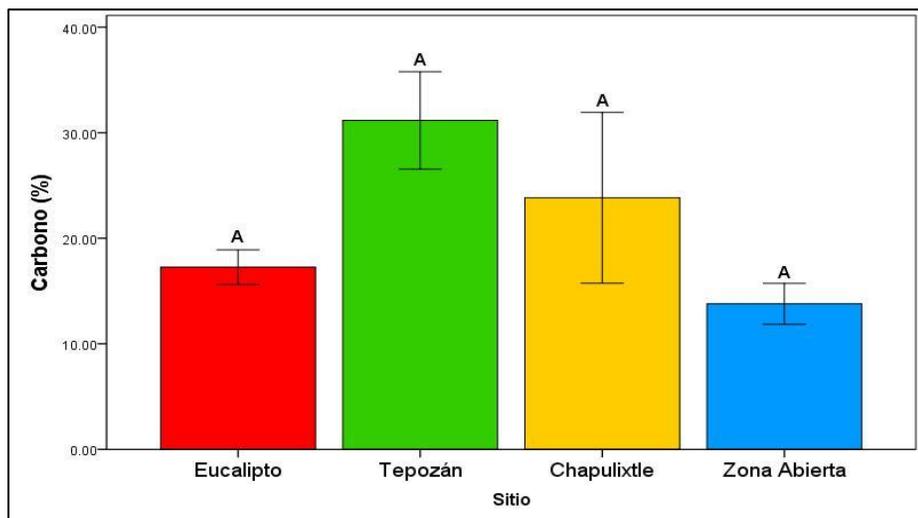


Figura 4.12. Contenido de C en el suelo (% \pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANDeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

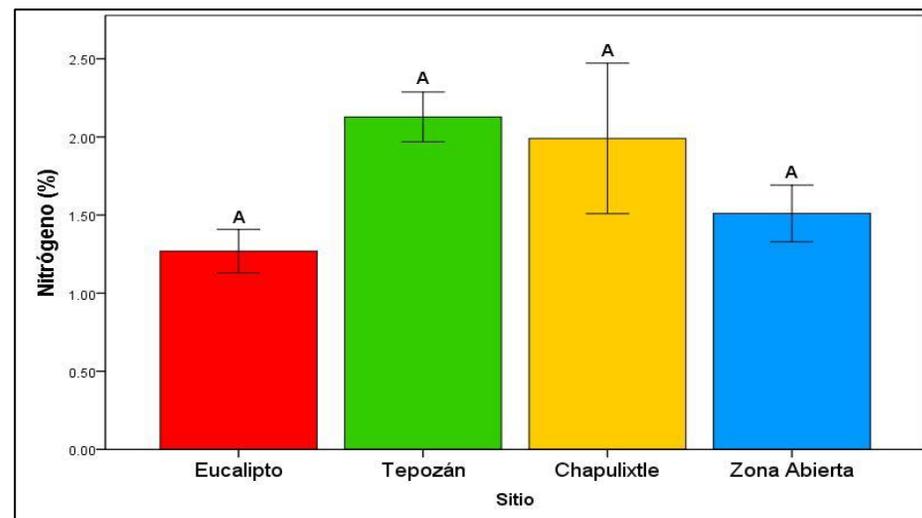


Figura 4.13. Contenido de N en el suelo (% \pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANDeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

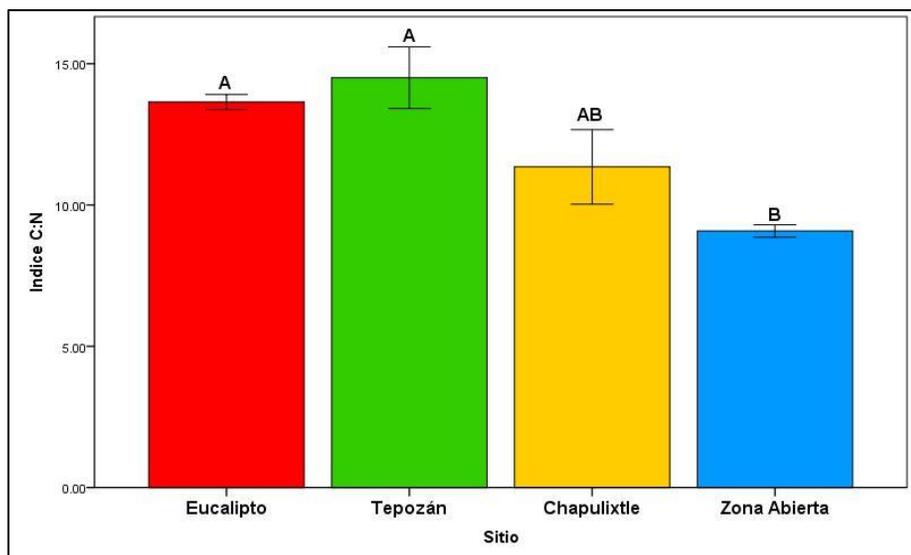


Figura 4.14. Valores del índice C:N \pm e.e. en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey). Valores promedio de tres réplicas.

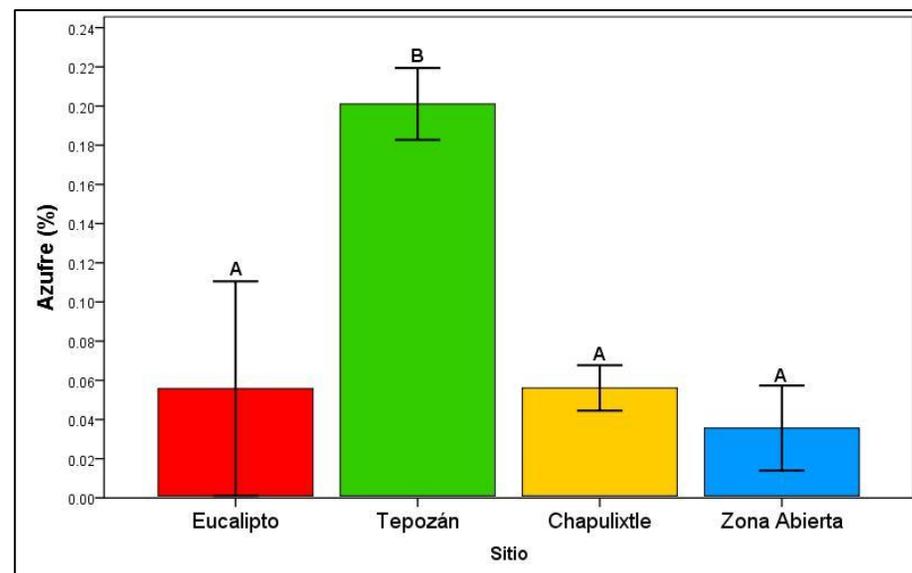


Figura 4.15. Contenido de S (% \pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey). Valores promedio de tres réplicas.

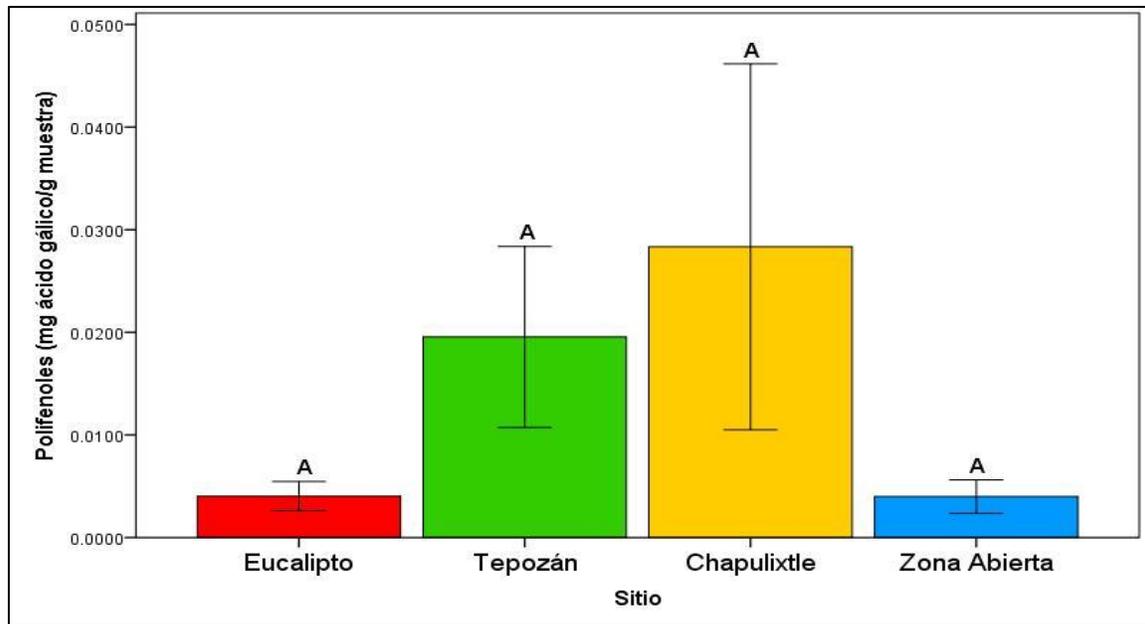


Figura 4.16. Contenido de polifenoles totales en el suelo (mg de ácido gálico / g \pm e.e.) en los cuatro tipos de microcosmos. Letras diferentes denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (ANDeVA de una vía). Valores promedio de tres réplicas.

4.4 Análisis integrado

A partir del análisis canónico de correspondencia se obtuvo un gráfico que muestra la relación entre la RFA y los rasgos del suelo con las comunidades vegetales que integran los microcosmos. A pesar de la ausencia de un patrón de segregación bien definido entre los microcosmos, se observa que los chapulixtles están mayormente asociados con un alto contenido de polifenoles, humedad, CE y N, y bajos valores de pH.

Por su parte, los tepozanes y los eucaliptos se relacionan principalmente con valores altos de pH, baja cantidad de RFA y bajo contenido de S. Mientras que las zonas abiertas están asociadas principalmente con elevada cantidad de RFA (Fig. 4.17).

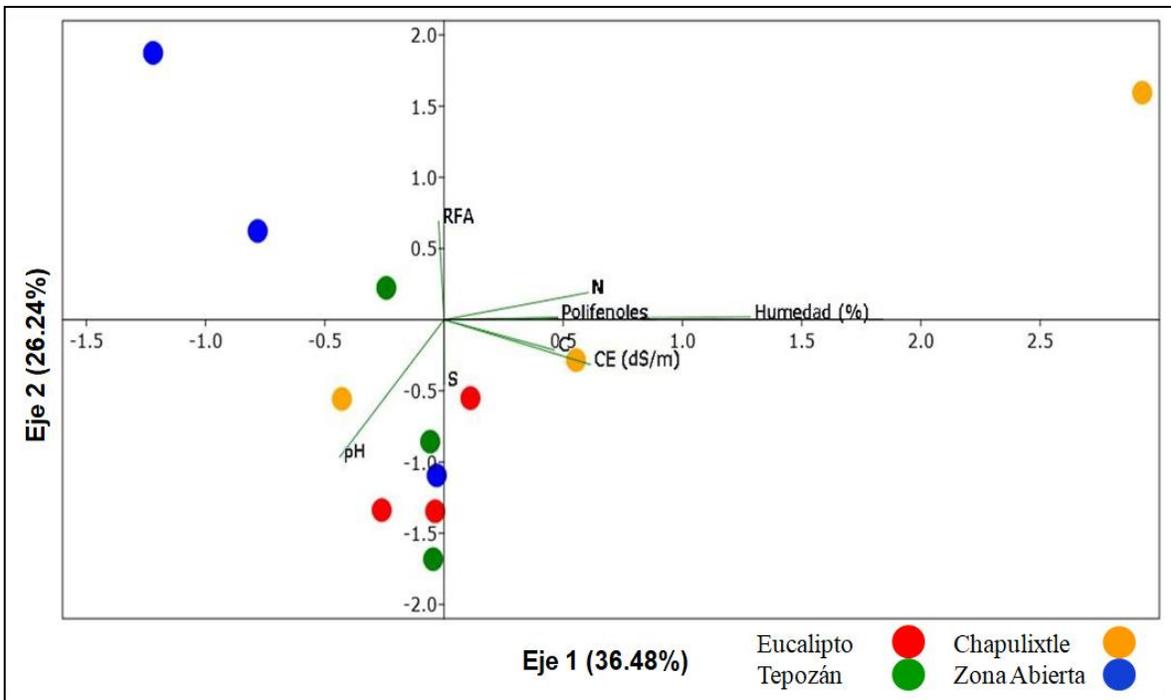


Figura 4.17. Análisis de correspondencia canónica de 12 ensamblajes de plantas en la zona núcleo oriente de la REPSA en relación con rasgos químicos edáficos y de incidencia de RFA. Datos de la temporada de secas de 2021.

V. DISCUSIÓN

5.1 Las comunidades vegetales de los microcosmos

Contrario a lo esperado, dada la naturaleza de los eucaliptos como especie exótica con el potencial de modificar la composición y diversidad de la vegetación nativa en un ecosistema (Kuldip *et al.* 2010), la riqueza de los ensamblajes reclutados bajo los eucaliptos fue muy similar a lo encontrado debajo de la copa de las especies nativas y en las zonas abiertas. Los cambios que se presentaron en estas comunidades respondieron sobre todo a la estacionalidad climática; al incrementarse en lluvias y reducirse en la temporada seca. Esto muestra la relevancia que tienen la heterogeneidad ambiental y temporal presentes en la REPSA sobre la composición de las comunidades vegetales (Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009) más que la incorporación de elementos alóctonos en este ecosistema.

Por otro lado, además de los efectos negativos que una especie exótica puede tener sobre las comunidades nativas en lo individual, ésta puede generar sinergias con otras especies exóticas que resulten en efectos perjudiciales para un mayor número de miembros en la comunidad (Allen *et al.*, 2020). Por tanto, se esperaba que los eucaliptos favorecieran la dominancia de especies exóticas, pero se encontró que esto no ocurre; de hecho, en lluvias son los sitios abiertos los que albergan mayor cobertura de este tipo de especies.

Al interior de todos los hábitats sólo se registró una especie catalogada como exótica: el pasto rosado, *Melinis repens*, especie originaria de Sudáfrica que debido a sus características como: tolerancia a diversas temperaturas, distintas formas de reproducción, cortas tasas de desarrollo y eficiente dispersión de semillas, se ha establecido tanto en hábitats naturales como en sitios perturbados (Melgoza-Castillo *et al.*, 2014). Los disturbios

de origen antrópico como los que se presentan en la REPSA, como construcciones y caminos, permiten su ingreso y proliferación en las zonas conservadas. Actualmente el pasto rosado se encuentra en todo el territorio nacional y son motivo de investigación las estrategias para su control y erradicación (Melgoza-Castillo *et al.*, 2014).

La baja dominancia e incluso ausencia, en función de la temporada, de este tipo de especies en todos los hábitats resulta positiva para la diversidad nativa, ya que se ha demostrado que las interacciones que estas desarrollan con el entorno y otros organismos pueden facilitar el crecimiento de otras exóticas y limitar el de las nativas (Allen *et al.*, 2020). Nuestros resultados aportan evidencia que indica que estos organismos no brindan un espacio de facilitación para el establecimiento de especies exóticas nuevas o el dominio de las ya presentes en las zonas núcleo de la REPSA.

Por su parte, dado el carácter nativo de los tepozanes en esta reserva, se esperaba que los ensamblajes bajo su área de influencia estuvieran compuestos en mayor proporción por especies nativas no arvenses, es decir, plantas seralmente tardías, con menores tasas de crecimiento y mayor demanda de recursos (Smith y Smith, 2005). Sin embargo, los ensamblajes bajo su copa estuvieron dominados por plantas nativas arvenses, especies sucesionalmente tempranas que cuentan con mecanismos exitosos para sobrevivir en ambientes perturbados, como una elevada producción de semillas, ciclos de vida cortos y rápidas tasas de germinación (Zamorano, 2006).

En este sentido, la presencia de los tepozanes y la identidad de los integrantes de los ensamblajes vegetales con los que cohabitan resultan relevantes para la estructura de las demás comunidades de la REPSA. Por un lado, estudios previos han identificado a los

tepozanes como uno de los miembros de mayor importancia para la supervivencia de los habitantes de esta reserva debido a que fungen como fuentes de alimento, sitios de forrajeo, anidamiento y protección de diversos grupos de fauna (San José-Alcalde, 2010; Moreira *et al.* 2019; Figueroa-Aquino, 2020). Por otra parte, esta especie se caracteriza por generar grandes cantidades de hojarasca y desarrollarse eficazmente en sitios perturbados. En particular, al interior de la REPSA coexiste notablemente con el pasto exótico “kikuyo” (*Cenchrus clandestinus*) y ha colonizado exitosamente algunas sitios con suelo no consolidado (González-Kladiano y Camacho-Morfin, 1994; Rzedowski y Rzedowski, 2005; Z. Cano-Santana, com. pers.).

Con base en ambas perspectivas, investigaciones futuras deben determinar el rol que representa para la REPSA esta especie en términos de los perjuicios o beneficios para los componentes bióticos y ambientales de la reserva y la dirección sucesional del ecosistema en su conjunto.

Por otra parte, la cantidad de radiación que reciben las comunidades vegetales del sotobosque es dependiente de la capacidad de la penetración de la luz a través del dosel de las especies vegetales dominantes como árboles y arbustos de mayor talla (Lambers *et al.*, 2008). En este trabajo no se encontraron diferencias en la cantidad de RFA incidente bajo la copa de las tres especies estudiadas, sólo se observó una obvia mayor incidencia de radiación en los sitios abiertos.

Finalmente, no se encontraron diferencias significativas en la composición y diversidad de los ensamblajes vegetales bajo la influencia de los eucaliptos y el resto de los microcosmos. Esto contrasta con lo reportado en las investigaciones del Laboratorio de

Interacciones y Procesos Ecológicos en las que, de manera general, se asocia a la ausencia de eucaliptos con un incremento en los índices de diversidad de las comunidades vegetales (Anexo 2).

Sin embargo, es preciso señalar que estos trabajos se han realizado principalmente en zonas de amortiguamiento; sitios que cuentan con una conectividad espacial reducida y una menor extensión territorial. También, albergan un mayor número de árboles de eucalipto, y están sujetos a mayores presiones de cambio (Maravilla-Romero, 2011) que las que experimentan las zonas núcleo.

Los anterior hace notar que el aislamiento entre ejemplares al interior de las zonas núcleo de la REPSA, donde se llevó a cabo este estudio, es un rasgo sustancial que limita los potenciales efectos negativos que produce la cercanía entre árboles como los que se presentan en las plantaciones de eucalipto. En estos sitios el dosel es homogéneo y se reduce el paso de luz a los estratos inferiores, lo que limita el establecimiento, crecimiento y desarrollo de los miembros del sotobosque (Scanlan, 1990; Johar *et al.*, 2017).

De igual modo, la topografía que presenta la REPSA es otro elemento que contribuye a evitar la homogeneidad en la composición de los ensamblajes asociados a las especies de estudio, debido a que ésta amplía los espacios de ocupación para la comunidad vegetal. Por ejemplo, los micrositos como oquedades, grietas y cuevas, facilitan el paso de radiación, la acumulación de nutrientes y la presencia de humedad en función de su orientación y la temporalidad climática (Castillo-Argüero *et al.*, 2007; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009), lo que se traduce en un incremento del abanico de formas de vida asociadas a los microcosmos analizados.

En otro orden de ideas, a pesar de no tener como objetivo generar un inventario botánico completo de las zonas núcleo de la REPSA, la lista de especies descritas en este trabajo representa una herramienta de actualización sobre las especies que habitan esta parte de la reserva. Entre ellas destaca la especie de orquídea *Triphora triantophora* cuya presencia es reportada con poca frecuencia en las distintas publicaciones sobre este ecosistema (Téllez y Flores, 2007).

Por su parte, y aunque no se encontraba en los sitios de muestreo se pudo documentar en la zona núcleo poniente, la presencia de un ejemplar de *Mammillaria haageana san-angelensis*, que a pesar de que en términos poblacionales su valor puede ser discutible, al encontrarse actualmente en peligro de extinción su registro es valioso como elemento superviviente frente a los cambios y presiones que enfrenta la REPSA, su hábitat natural (Padilla-Hernández *et al.*, 2020).

5.2 Rasgos del suelo y su relación con las comunidades vegetales

El grado de acidez o alcalinidad en los suelos es fundamental para el desarrollo de los procesos fisiológicos en las plantas. En este trabajo todos los suelos mostraron niveles de pH bajos (4.4-5.2), es decir, presentan un carácter ácido. Los suelos clasificados como ácidos, pueden restringir el aprovechamiento de nutrientes por parte de las especies vegetales (Osman, 2013).

Los datos obtenidos en este trabajo son semejantes a lo reportado por Razo-González *et al.* (2014) (5.1-5.3) y ligeramente menores que lo descrito por Castellanos-Vargas *et al.* (2017) (5.3-6.1) para los suelos de la REPSA. En contraparte con lo reportado

por Soumare *et al.* (2016) nuestros resultados indican que los eucaliptos en esta reserva no propician un aumento de acidez en los suelos. Tal condición se traduce en que la disponibilidad y el procesamiento de nutrimentos empleados por las plantas no se encuentran comprometidos más que en los sitios sin eucaliptos donde el pH registrado también es ácido.

Por otro lado, se encontró un bajo porcentaje de humedad en los suelos de los cuatro hábitats durante la temporada seca (8.2-10.9%), valores semejantes a los reportado por Razo-González *et al.* (2014; 8.2-8.5%) y menores a lo descrito por Castellanos-Vargas *et al.* (2017; 13.2-23.8%) para los suelos de la REPSA. Estos resultados se explican en términos de la estructura de los suelos que componen la REPSA, ya que los suelos tipo leptosol, son en general secos, debido a su elevada porosidad que permite la rápida infiltración y restringe la retención del agua (Siebe *et al.*, 2003).

Tales condiciones hídricas limitan el establecimiento de especies vegetales con continuos requerimientos de agua para desarrollarse; no obstante, la vegetación de la reserva presenta diversas formas de crecimiento con bajas demandas hídricas, entre las que se encuentran, plantas terofitas, hemicriptofitas y criptofitas que empatan su desarrollo con la marcada época de lluvias con la que cuenta la REPSA (Castillo-Argüero *et al.*, 2007).

Con relación al carbono, componente principal de las moléculas orgánicas y principal elemento a través del cual fluye la energía en los ecosistemas (Smith y Smith, 2007), no se encontraron diferencias en los porcentajes presentes en los suelos bajo la influencia de los eucaliptos y el resto de los hábitats. Sin embargo, es importante hacer notar el rango de amplitud entre los valores obtenidos (13.7-31.1%), mismos que se

distancian tanto en la medición inferior como en la superior respecto a lo reportado para los suelos de esta localidad por Razo-González *et al.*, 2014 (19.0-21.6%).

El elevado contenido de C registrado en los suelos de la REPSA posibilita la acumulación de nutrientes disponibles tanto para los organismos productores como para los consumidores en este hábitat (Brady y Weil, 2017), y a su vez, repercute en la ampliación de la diversidad biótica que se desarrolla en esta reserva.

Se encontró que el contenido de nitrógeno, un elemento indispensable para los organismos vegetales al formar parte de la estructura de múltiples biomoléculas necesarias para la función y el desarrollo celular (Azcón-Bieto y Talón, 2013), no fue distinto en los suelos bajo la copa de los eucaliptos respecto a los demás hábitats (1.2-2.1% en promedio), resultados análogos a lo obtenido por Razo-González *et al.* 2014 (1.7-1.8%).

Los valores de N encontrados en este trabajo se pueden clasificar como muy altos, ya que el rango de contenido de este elemento en los suelos va de muy bajo (<0.05%) a nivel medio (0.15-0.25%) y muy alto (>0.5%) (Hazelton y Murphy, 2016). En este sentido, podemos mencionar que, dadas las altas cantidades de N en los suelos de la REPSA la tasa de crecimiento microbiano se ve favorecida, con lo cual el ritmo de descomposición en este ecosistema puede incrementar, lo que incide directamente en la disponibilidad de nutrientes que pueden ser aprovechados por otras comunidades microbianas u organismos vegetales (Fernández-Linares *et al.*, 2006).

Por su parte, la relación carbono-nitrógeno (C:N) es un indicador de la tasa de descomposición de la materia orgánica así como de la disponibilidad de recursos nutrimentales, inicialmente aprovechados por la biota edáfica y posteriormente absorbidos

y asimilados por los productores primarios (Brady y Weil, 2017). Los resultados obtenidos muestran que la relación carbono-nitrógeno (C:N) fue significativamente más alta en los suelos bajo la influencia de los tepozanes y eucaliptos que en las zonas abiertas y no difirieron de los chapulixtles (9.0 y 14.5).

Las diferencias de esta relación dentro de los sitios muestreados indican que la velocidad de descomposición en los suelos asociados a las especies con mayor tamaño de copa es más lenta que los sitios sin cobertura. Debido a que la velocidad de descomposición de la hojarasca en los suelos a nivel local está regida por las condiciones climáticas y su composición química (Adl, 2003), es posible que dados los mayores tamaños de copa de los eucaliptos y los tepozanes exista igualmente un mayor aporte de material orgánico por parte de estas especies, que aunado a su composición química haga más lento el proceso de mineralización respecto a los sitios con un menor aporte de residuos orgánicos.

Esta condición está documentada para los tepozanes al interior de la REPSA por Arango-Galván (2006), quien concluyó que *B. cordata* es la especie cuya hojarasca presenta la menor velocidad de descomposición respecto a otras especies vegetales dominantes al interior de esta reserva.

Por último, los suelos bajo influencia de los tepozanes presentaron una concentración de azufre significativamente más alto que el suelo bajo los chapulixtles, los eucaliptos y las zonas abiertas, de hecho, en promedio, un contenido 5 veces mayor. Los valores más reducidos de azufre bajo los eucaliptos y chapulixtles pueden ser potencialmente negativos para el desarrollo de estas especies ya que la baja disponibilidad de azufre puede incidir de manera indirecta en las actividades fisiológicas de estas especies,

debido a que el contenido de azufre es esencial en el metabolismo vegetal, en particular en la composición y actividad de aminoácidos, enzimas y proteínas, además de su función en la protección contra estresores ambientales y la catálisis de clorofila (Osman, 2013).

Dado que los eucaliptos son árboles identificados por producir una importante cantidad de metabolitos secundarios, entre los que se encuentran los polifenoles (compuestos que impiden la mineralización de la materia orgánica mediante su asociación con compuestos nitrogenados) (Koocheki *et al.*, 2013; Soumare *et al.*, 2016; Sabo y Knezevic, 2019), se esperaba que en el suelo bajo la copa de los eucaliptos se registraran alto contenido de estos compuestos.

No obstante, en este trabajo se encontró que el contenido de polifenoles bajo la copa de los eucaliptos es muy bajo y que éste no difiere significativamente de los valores registrados para los otros tres microcosmos. Nuestros resultados contrastan con los obtenidos en otros trabajos como los de Espinosa *et al.* (2008) y Soumare *et al.* (2016), quienes reportan una alta acumulación de polifenoles en los suelos de rodales de eucaliptos. En este sentido, es preciso tomar en cuenta que los resultados obtenidos por los autores mencionados provienen de ecosistemas cuyos suelos presentan mayor desarrollo a los de la REPSA. Otro elemento que podría explicar la ausencia de la acumulación de polifenoles en los suelos bajo los eucaliptos estriba sobre las interacciones ecológicas que estos árboles desarrollan dentro de la REPSA ya que debido a que las condiciones climáticas adversas y la reducida disponibilidad de nutrientes debido al estado de los suelos en formación (Siebe *et al.*, 2003), es posible que los eucaliptos opten por dirigir sus recursos a su mantenimiento y sobrevivencia y no al establecimiento de estrategias de competencia con los demás miembros de la comunidad (Smith y Smith, 2007).

Por lo anterior, resulta necesario un análisis más profundo y robusto del éxito de estos árboles en términos de la composición de sus características físicas y fisiológicas en sitios con recursos limitados y condiciones climáticas complejas como las que presentan esta reserva.

5.3 El rol de los eucaliptos en la REPSA

Las especies exóticas generalmente se asocian con efectos negativos sobre la riqueza y diversidad de los ecosistemas donde son introducidas; sin embargo, esto no es siempre cierto para todas las especies ni en todos los ecosistemas ya que existen factores ambientales que modifican las interacciones dentro de las comunidades que pueden alterar esta respuesta (Bernard-Verdier y Hulme, 2015). En este sentido, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que, contrario a la percepción general de los eucaliptos como especie exótica potencialmente invasora de la REPSA, en general, no se encontraron evidencias de afectación sobre las características del suelo o en las comunidades vegetales dentro de las zonas núcleo de la REPSA, por lo cual resulta importante incrementar los elementos de análisis sobre los componentes y las características ambientales que pudieran explicar el verdadero papel que los eucaliptos representan actualmente para la REPSA.

Bernard-Verdier y Hulme (2015) mencionan que existen especies nativas que podrían tener efectos similares e incluso de mayor magnitud que los señalados para las especies exóticas en función principalmente de su abundancia o biomasa. Tal es el caso de lo reportado en este estudio sobre la asociación de los tepozanes con plantas arvenses el interior de la REPSA, que en comparación con los eucaliptos sugieren la facilitación para

su establecimiento bajo la zona de influencia de esta especie, por lo que es importante confirmar este efecto en investigaciones futuras.

Por otro lado, la conversión de ecosistemas naturales y el reemplazo de las especies que lo habitan por monocultivos de eucaliptos generan la uniformidad de la estructura del ecosistema lo que provoca a su vez la pérdida de heterogeneidad ambiental y, con ello, espacios para la conservación de la fauna (Gardner *et al.*, 2007; Kanowski *et al.*, 2005; Lo-Man-Hung *et al.*, 2008). Debido a que en este trabajo sólo se evaluaron a las comunidades de plantas y el estudio más próximo sobre el efecto de los eucaliptos sobre la fauna local es el de Figueroa-Aquino (2020), quien discute que los eucaliptos son utilizados por las aves para percha y forrajeo, se requiere realizar más investigación acerca de los efectos que los eucaliptos generan sobre los diversos grupos de fauna que habitan la REPSA.

5.4 Consideraciones sobre el diseño experimental

El presente trabajo buscó integrar además de los elementos bióticos como se ha hecho en otras publicaciones, factores abióticos que a pesar de ser frecuentemente mencionados no se habían sometido a mediciones en la REPSA. A pesar de que la información recabada cumple con los objetivos planteados existen elementos que contribuirían a robustecer la información obtenida.

Se planeó coleccionar un número de muestras de suelo mayor al reportado, sin embargo, debido a la pandemia de COVID-19 que se presentó a escala mundial la cantidad de muestreos se vio reducido respecto a lo planificado en un inicio, por lo cual se sugiere realizar un muestreo de suelo en las dos zonas núcleo y en las dos estaciones climáticas que

presenta la REPSA, además de un muestreo con más fineza y un mayor número de réplicas. También sería deseable un análisis de laboratorio a mayor profundidad sobre la composición química, así como la identificación y cuantificación de los metabolitos secundarios para confirmar con mayor robustez lo reportado en este trabajo.

Por su parte, la medición de la RFA se realizó a medio día y sólo en la temporada de secas por lo que no se abarcó la variación completa de este factor, por tanto cabe la posibilidad de que la radiación incidente presente valores superiores o inferiores en mediciones más amplias y esto se traduzca en efectos diferentes para las comunidades de la REPSA.

VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y la discusión elaborada se presentan las siguientes conclusiones:

1. Los eucaliptos *Eucalyptus camaldulensis* aislados en las zonas núcleo de la REPSA no muestran un efecto negativo sobre la estructura de las comunidades vegetales que albergan bajo su sombra. Asimismo, no favorecen el establecimiento de especies exóticas ni de plantas nativas arvenses (sucesionalmente tempranas).
2. La estacionalidad en las lluvias fue el factor más importante que afecta la diversidad, composición y riqueza de plantas en los cuatro microcosmos estudiados.
3. Los eucaliptos aislados no albergan bajo su copa altas concentraciones de polifenoles y la reducción que hacen a la RFA no difiere de la que provocan especies nativas como *Buddleja cordata* o *Dodonaea viscosa*.
4. No se encontraron evidencias que se asocien con efectos alelopáticos producidos por eucaliptos aislados dentro de la REPSA.
5. Los microcosmos bajo la copa de los tepozanes se distinguen por su baja diversidad vegetal y alta dominancia de especies nativas arvenses (sucesionalmente tempranas), por lo que se recomienda realizar investigaciones sobre el papel de esta especie nativa y valorar su presencia en términos de los recursos que representa para los habitantes de la REPSA y el proceso de sucesión ecológica de este ecosistema.
6. Las características del tipo de suelo de la REPSA así como sus condiciones climáticas tienen una función esencial sobre el desarrollo y las interacciones que los eucaliptos desempeñan en este ecosistema.

La perspectiva integral del análisis de microcosmos llevada a cabo en este trabajo representa una herramienta de información robusta, ya que además de tomar en cuenta elementos bióticos y factores ambientales se implementó en condiciones naturales lo cual permite estudiar las interacciones que se desarrollan de forma natural dentro de la REPSA y esto hace que la información obtenida sea representativa de los efectos que los eucaliptos presentan dentro de este ecosistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adl, S. M. 2003. *The ecology of soil decomposition*. CABI Publishing, Reino Unido.
- Afzal, S., Nawaz, M. F., Siddiqui, M. T. y Aslam, Z. 2018. Comparative study on water use efficiency between introduced species (*Eucalyptus camaldulensis*) and indigenous species (*Tamarix aphylla*) on marginal sandy lands of Noorpur Thal. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(1): 127–135.
- Ahmed, R., Hoque, A. R. y Hossain, M. K. 2018. Allelopathic effects of leaf litters of *Eucalyptus camaldulensis* on some forest and agricultural crops. *Journal of Forestry Research*, 19(1): 19-24.
- Aguirre-Muñoz, A. y Mendoza-Alfaro, R. 2009. Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. Págs. 277-318, en: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) (ed.). *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México.
- Allen, W. J., Wainer, R., Tylianakis, J. M., Barratt, B. I., Shadbolt, M. R., Waller, L. P. y Dickie, I. A. 2020. Community-level direct and indirect impacts of an invasive plant favour exotic over native species. *Journal of Ecology*, 108(6): 2499-2510.
- Antonio-Garcés, J. I. 2008. Restauración ecológica de la zona de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F. (México). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Arango-Galván, A. 2006. Heterogeneidad espacial y dinámica de la descomposición de la hojarasca de cuatro especies abundantes en la Reserva Ecológica del Pedregal del San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ayala, M. 2014. La comunidad vegetal y abundancia de dos artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel tras cuatro años de acciones de restauración. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2013. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2a. edición McGraw-Hill Interamericana, Barcelona.
- Bernard-Verdier, M. y Hulme, P. E. 2015. Alien and native plant species play different roles in plant community structure. *Journal of Ecology*, 103(1): 143-152.
- Brady, N. C. y Weil, R. R. 2017. *The nature and properties of soils*. 15a. edición. Pearson Education Limited, Harlow.
- Callaway, R. M. 2007. *Positive interactions and interdependence in plant communities*. Springer, Dordrecht, Países Bajos.
- Cano-Santana, Z. 1994a. Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acrididae) y productividad primaria neta aérea en una comunidad xerófila. Tesis doctoral. Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades/Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Cano-Santana, Z. 1994b. La reserva del Pedregal como ecosistema: estructura trófica. Págs. 149-158, en: Rojo, A. (comp.). *Reserva ecológica El Pedregal de San Ángel: Ecología, historia natural y manejo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cano-Santana, Z., Pisanty, I., Segura, S., Mendoza-Hernández, P.E., León-Rico, R., Soberón J., Tovar, E., Martínez-Romero, E., Ruiz, L.C. y Martínez-Ballesté, A. 2006. Ecología, conservación, restauración y manejo de las áreas naturales y protegidas del Pedregal del Xitle. Págs. 203-226, en: Oyama, K. y Castillo, A. (coords.). *Manejo conservación y restauración de recursos naturales en México: Perspectivas desde la investigación científica*. Siglo XXI/Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cano-Santana, Z., San José, M., Ayala, M., Saucedo-Morquecho, E., Garmendia-Corona, A., Antonio-Garcés, J., Peña, M., Villeda, M., Orozco, A., González-Rebeles Guerrero, G. y Muñoz-Saavedra, R. 2010. *Cambios de la vegetación y la fauna de un pedregal sometido a restauración ecológica*. III Simposio Internacional de Restauración Ecológica. Santa Clara, Cuba.
- Castaño, C., Dejene, T., Mediavilla, O., Geml, J., Oria-de-Rueda, J. A. y Martín-Pinto, P. 2019. Changes in fungal diversity and composition along a chronosequence of *Eucalyptus grandis* plantations in Ethiopia. *Fungal ecology*, 39: 328-335.
- Castellanos-Vargas, I., García Calderón, N. E. y Cano-Santana, Z. 2017. Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana*, 35: 51-64.

- Castillo-Argüero, S., Montes-Cartas, G., Romero-Romero, M., Martínez-Orea, Y., Guadarrama-Chávez, P., Sánchez-Gallén, I. y Núñez Castillo, O. 2004. Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (74): 51-75.
- Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Romero-Romero, M. A., Guadarrama-Chávez, P., Núñez-Castillo, O., Sánchez-Gallén, I. y Meave, J. A. 2007. *La reserva ecológica del Pedregal de San Ángel: Aspectos florísticos y ecológicos*. Coordinación de la Investigación Científica. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Castillo-Argüero, S., Martínez-Orea, Y., Meave, J. A., Hernández-Apolinar, M., Núñez-Castillo, O., Santibañez-Andrade, G. y Guadarrama-Chávez, P. 2009. Flora: susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. Págs. 107-133, en: Lot, A. y Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Chanie, T., Collick, A. S., Adgo, E., Lehmann, C. J. y Steenhuis, T. S. 2013. Eco-hydrological impacts of *Eucalyptus* in the semi humid Ethiopian Highlands: the Lake Tana Plain. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(1): 21-29.
- Chou, C. H. 2006. Introduction to allelopathy. Págs. 1-9, en: Reigosa, M. J., Pedrol, N. y González, L. (eds.). *Allelopathy: a physiological process with ecological implications*. Springer, Dordrecht.

- Chu, C., Mortimer, P. E., Wang, H., Wang, Y., Liu, X. y Yu, S. 2014. Allelopathic effects of *Eucalyptus* on native and introduced tree species. *Forest Ecology and Management*, 323: 79–84.
- Coelho, M., Juen, L. y Mendes-Oliveira, A. C. 2014. The role of remnants of Amazon savanna for the conservation of Neotropical mammal communities in eucalyptus plantations. *Biodiversity and Conservation*, 23(13): 3171-3184.
- Colwell, R. K., 2013. EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9 and earlier. User's Guide and application.
- Coppen, J. J. W. 2002. *Eucalyptus: The genus Eucalyptus*. Taylor and Francis, Londres.
- Cravino, A. y Brazeiro, A. 2021. Grassland afforestation in South America: Local scale impacts of eucalyptus plantations on Uruguayan mammals. *Forest Ecology and Management*, 484, 118937.
- De la Fuente, J. 2005. Acuerdo por el que se rezonifica, delimita e incrementa la zona de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria. *Gaceta UNAM*, 2 de junio de 2005: 20-21.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México.
- Ehrenfeld, J. G. 2003. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 6(6): 503-523.

- EOL, Encyclopedia of Life. 2020a. *Buddleja cordata*. Disponible en: <<https://eol.org/pages/301398>>, consultado el 20 de mayo de 2020.
- EOL, Encyclopedia of Life. 2020b. *Dodonaea viscosa*. Disponible en: <<https://eol.org/pages/301398>>, consultado el 20 de mayo de 2020.
- Espinosa-García, F. J. 1996. Revisión sobre la alelopatía de *Eucalyptus* L'Herit. *Botanical Sciences*, (58): 55-74.
- Espinosa-García, F. J., Martínez-Hernández, E. y Quiroz-Flores, A. 2008. Allelopathic potential of *Eucalyptus* spp plantations on germination and early growth of annual crops. *Allelopathy Journal*, 21(1): 25-37.
- Ezcurra, E., Mazari-Hiriart, M., Pisanty, I. y Aguilar, A. G. 1999. *The basin of Mexico*. United Nations of University Press, Tokio.
- Fernández-Linares, L. C., Rojas-Avelizapa, N. G., Roldán-Carrillo, T. G., Ramírez-Islas M. E., Zerraga-Martínez, H. G., Uribe-Hernández, R., Reyes-Ávila, R. J., Flores-Hernández, D. y Arce-Ortega, J. M. 2006. *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de suelos contaminados*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología e Instituto Mexicano del Petróleo. México.
- Figuroa-Aquino, M. 2020. Estructura de la comunidad de aves y redes planta-ave en zonas sujetas a restauración y conservadas de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Forbes, S. 1887. The lake as a microcosm. *Bulletin of the Scientific Association* (Peoria, IL): 77-87.
- Gardner, T. A., Ribeiro-Júnior, M. A., Barlow, J. O. S., Ávila-Pires, T. C. S., Hoogmoed, M. S. y Peres, C. A. 2007. The value of primary, secondary, and plantation forests for a neotropical herpetofauna. *Conservation Biology*, 21(3): 775-787.
- Grimm, N. B. 1995. Why link species and ecosystems? A perspective from ecosystem ecology. Págs. 5–15., en: Jones, C. G. y Lawton, J. H. (eds.). *Linking species and ecosystems*. Chapman and Hall, Nueva York.
- Goded, S., Ekroos, J., Domínguez, J., Azcárate, J. G., Guitián, J. A. y Smith, H. G. 2019. Effects of eucalyptus plantations on avian and herb species richness and composition in North-West Spain. *Global Ecology and Conservation*, 19, e00690.
- González-Jaramillo, S. I. 2018. Estructura y composición de la comunidad vegetal de dos sitios sujetos a acciones de restauración durante el periodo 2005-2012 en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- González-Kladiano, V. y Camacho-Morfin, F. 1994. Avances en la propagación de cuatro especies presentes en El Pedregal de San Ángel D.F. Págs. 403-410, en: Rojo, A. (comp.). *Reserva ecológica El Pedregal de San Ángel: Ecología, historia natural y manejo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1).
- Hansson, L-A., Brodersen, J., Chapman, B. B., Ekvall, M. K., Hargeby, A., Hulthén, K., Nicolle, A., Nilsson, P. A., Skov, C. y Brönmark, C. 2013. A lake as a microcosm: reflections on developments in aquatic ecology. *Aquatic Ecology*, 47: 125-135.
- Hazelton, P. y Murphy, B. 2016. *Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?* CSIRO Publishing, Melbourne.
- Hinke, N. 2000. La llegada del eucalipto a México. *Ciencias*, (58): 60-62.
- IBM Corp. Released. 2011. IBM SPSS Statistics for Windows, version 20.0. IBM Corp. Armonk, Nueva York.
- IPBES. 2019 *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES Secretariat, Bonn.
- IUCN, International Union for Conservation of Nature. 2000. Guidelines for the prevention of biodiversity loss caused by alien invasive species. Disponible en: <<https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/Rep-2000-052.pdf>>, consultado el 13 de mayo de 2020.
- Johar, V., Dhillon, R. S., Bhardwaj, K. K., Bisht, V. y Kumar, T. 2017. Effect of light intensity on yield of wheat under *Eucalyptus tereticornis* based agri-silvicultural system. *Indian Journal of Ecology*, 44: 95-99.

- Kanowski, J., Catterall, C. P. y Wardell-Johnson, G. W. 2005. Consequences of broadscale timber plantations for biodiversity in cleared rainforest landscapes of tropical and subtropical Australia. *Forest Ecology and Management*, 208: 359-372.
- Koocheki, A., Lalegani, B. y Hosseini, S. A. 2013. Ecological consequences of allelopathy. Págs. 23-38, en: Cheema Z. A., Farooq, M. y Wahid A. (eds.). *Allelopathy: current trends and future applications*. Springer, Berlín.
- Kuldip, S. D., Sarvesh, K. S., Parveen, K. D. y Seema, S. 2010. Alien plant invasion and their impact on indigenous species diversity at global scale: A review. *Journal of ecology and the natural environment*, 2(9): 175-186.
- Lambers, H., Chapin III, F. S. y Pons, T. L. 2008. *Plant physiological ecology*. Springer, Nueva York.
- Lo-Man-Hung, N. F., Gardner, T. A., Ribeiro-Júnior, M. A., Barlow, J. y Bonaldo, A. B. 2008. The value of primary, secondary, and plantation forests for Neotropical epigeic arachnids. *The Journal of Arachnology*, 36(2): 394-401.
- Lorenzo, P. y González, L. 2010. Alelopatía: una característica ecofisiológica que favorece la capacidad invasora de las especies vegetales. *Revista Ecosistemas*, 19(1): 79-91.
- Maravilla-Romero, M. C. 2011. Flora y vegetación de nueve áreas naturales de Ciudad Universitaria, México, D. F. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Martínez-Cruz, O. y Paredes-López, O. 2014. Phytochemical profile and nutraceutical potential of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) by ultra high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1346: 43-48.
- Martins, C., Natal-da-Luz, T., Sousa, J. P., Gonçalves, M. J., Salgueiro, L. y Canhoto, C. 2013. Effects of essential oils from *Eucalyptus globulus* leaves on soil organisms involved in leaf degradation. *PLoS One*, 8(4): e61233.
- Melgoza Castillo, A., Balandrán Valladares, M. I., Mata-González, R. y Pinedo Álvarez, C. 2014. Biología del pasto rosado *Melinis repens* (Willd.) e implicaciones para su aprovechamiento o control: Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 5(4): 429-442.
- Moreira, X., Romero-Pérez, A., Luna-Chaparro, E., Orona-Tamayo, D., Quintana-Rodríguez, E., Reyes-Chilpa, R., Abdala-Roberts, L., Cano-Santana, Z. y Hernández-Cumplido, J. 2019. Effects of plant sex on insect abundance across three trophic levels in the perennial shrub *Buddleja cordata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(11): 950-956.
- Morelos-Rebollar, J. 2019. Respuesta de la comunidad vegetal a la remoción de eucaliptos con fines de restauración en la zona A2 de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Muñoz-Saavedra, R. 2013. Efecto de cinco años de restauración sobre la comunidad vegetal y dos poblaciones de artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de

- San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Nava-López, M., Jujnovsky, J., Salinas-Galicia, R., Álvarez-Sánchez, J. y Almeida-Leñero, L. 2009. Servicios ecosistémicos. Págs. 51-60, en: Lot, A. y Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Odum, E. P., Barrett, G. W. y Aguilar Ortega, M. T. 2006. *Fundamentos de ecología*. 5a. edición. Thomson, México.
- Orozco-Segovia, A., de Buen-Gamboa, A. y Barradas-Miranda, V. 2009. La diversidad funcional del ecosistema. Págs. 295-316, en: Lot, A. y Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Osman, K. T. 2013. *Soils: Principles, properties and management*. Springer, Dordrecht.
- Ovington, J. D. 1955. Studies of the development of woodland conditions under different trees: III. The ground flora. *The Journal of Ecology*, 43: 1-21.
- Padilla-Hernández, L., Castellanos-Vargas, I. y Cano-Santana, Z. 2020. *Historia natural de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Paz, C. P., Gallon, M., Putzke, J. y Ganade, G. 2015. Changes in macrofungal communities following forest conversion into tree plantations in Southern Brazil. *Biotropica*, 47(5): 616-625.

- Peña-Mendoza, M.T. 2016. Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de animales importantes en el NE de la Zona de Amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en respuesta a acciones de restauración ecológica. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Poore, M. D. y Fries, C. 1987. *Efectos ecológicos de los eucaliptos*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma.
- Ramírez-González, A. 2006. *Ecología: Métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Raven, P. H., Evert, R. F. y Eichhorn, S. E. 2013. *Biology of plants*. W. H. Freeman and Company, Nueva York.
- Razo-González, M., Castaño-Meneses, G., Callejas-Chavero, A., Pérez-Velázquez, D. y Palacios-Vargas, J. G. 2014. Temporal variations of soil arthropods community structure in El Pedregal de San Ángel ecological reserve, Mexico City, Mexico. *Applied Soil Ecology*, 83: 88-94.
- REPSA, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. 2020. REPSA, Características. Disponible en: <www.repsa.unam.mx>, consultado el 15 de mayo de 2020.
- Rivero-Serrano, O. 1983. Beneficia a la zona sur del Distrito Federal la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria. *Gaceta UNAM*, 3 de octubre 1983, 59(1):16-17.

- Rueda, A. M. y Cano-Santana, Z. 2009. Artrópodo-fauna. Págs. 171-201, en: Lot, A. y Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Rzedowski, G. C. y Rzedowski, J. 2005. *Flora fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Sabo, V. A. y Knezevic, P. 2019. Antimicrobial activity of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. plant extracts and essential oils: A review. *Industrial Crops and Products*, 132: 413-429.
- Saccol, S. D. S. A., Bolzan, A. M. R. y Dos Santos, T. G. 2017. In the shadow of trees: does *Eucalyptus* afforestation reduce herpetofaunal diversity in Southern Brazil?. *South American Journal of Herpetology*, 12(1): 42-56.
- San José-Alcalde, M. 2010. Monitoreo de las actividades de la fauna de vertebrados en dos zonas sujetas a restauración en la Reserva del Pedregal de San Ángel, D.F. (México). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Santibáñez-Andrade, G., Castillo-Argüero, S., Zavala-Hurtado, J. A., Martínez Orea, Y. y Hernández Apolinar, M. 2009. La heterogeneidad ambiental en un matorral xerófilo. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (85): 71-79.
- Saucedo-Morquecho, E. A. 2011. Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de artrópodos durante un proceso de restauración ecológica en el área

- de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Scanlan, J. C. y Burrows, W. H. 1990. Woody overstorey impact on herbaceous understorey in *Eucalyptus* spp. communities in central Queensland. *Australian Journal of Ecology*, 15(2): 191-197.
- Segura–Burciaga S. G. 1995. Estudio poblacional de *Eucalyptus resinifera* Smith (Myrtaceae) en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel, C.U., México, D.F. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Segura–Burciaga S. G. 2009. Introducción de especies: la invasión y el control de *Eucalyptus resinifera*. Págs. 533-538, en: Lot, A. y Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Segura-Burciaga, S. G. y Meave, J. 2001. Effect of the removal of the exotic *Eucalyptus resinifera* on the floristic composition of a protected xerophytic shrubland in southern Mexico City. Págs. 319-330, en: Brundu, G., Brock, J., Camarda, I., Child, L. y Wade, M. (eds.). *Plant invasions: Species ecology and ecosystem management*. Backhuys Publishers, Leiden.
- Siebe, C. 2000. Age and archaeological implications of Xitle volcano, Southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104: 45-64.

Siebe, C., Bocco, G., Sánchez, J. y Velázquez, A. 2003. Suelos: Distribución, características y potencial de uso. Págs. 127-164, en: Velázquez, A., Torres, A. y Bocco, G. (eds.). *Las enseñanzas de San Juan: Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Siebe, C., Mendoza-Hernández, P. E., Juárez-Orozco, S. M., Vázquez-Selem, L. y Cram, S. 2016. Consecuencias de la actividad volcánica del Xitle y el disturbio antrópico sobre las propiedades del suelo y la diversidad vegetal del Parque Ecológico de la Ciudad de México en el Ajusco medio. Págs. 75-91, en: CONABIO-SEDEMA. *La biodiversidad en la Ciudad de México, vol. 1*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad/Secretaría del Medio Ambiente, México.

Simberloff, D. y Rejmanek, M. 2011. *Encyclopedia of biological invasions*. University of California Press, Berkeley.

Slee, A. V., Brooker, M. I. H., Duffy, S. M. y West, J. G. 2015. EUCLID, Eucalypts of Australia. Disponible en: <https://apps.lucidcentral.org/euclid/text/intro/index.html>, consultado el 20 de mayo de 2020.

Smith, R. L. y Smith, T. M. 2005. *Ecología*. 6a. edición. Pearson, Madrid.

Soumare, A., Sall, S. N., Sanon, A., Cissoko, M., Hafidi, M., Ndoye, I. y Duponnois, R. 2016. Changes in soil pH, polyphenol content and microbial community mediated by *Eucalyptus camaldulensis*. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(3): 1-19.

- Srivastava, D. S., Kolasa, J., Bengtsson, J., Gonzalez, A., Lawler, S. P., Miller, T. E., Munguia, P., Romanuk, T., Schneider, D. C. y Trzcinski, M. K. 2004. Are natural microcosms useful model systems for ecology? *Trends in Ecology & Evolution*, 19(7): 379–384.
- Strayer, D. L., Eviner, V. T., Jeschke, J. M. y Pace, M. L. 2006. Understanding the long-term effects of species invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(11): 645-651.
- Téllez-Velasco, A. y Flores-Villanueva, L. 2007. *Orquídeas terrestres del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2018. *The World's Cities in 2018*. United Nations, Nueva York.
- Villaseñor, J. L. 2016. Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3): 559-902.
- Yang, Y. J., Tong, Y. G., Yu, G. Y., Zhang, S. B. y Huang, W. 2018. Photosynthetic characteristics explain the high growth rate for *Eucalyptus camaldulensis*: Implications for breeding strategy. *Industrial Crops and Products*, 124: 186-191.
- Zahn, A., Rainho, A., Rodrigues, L. y Palmeirim, J. M. 2009. Low macro-arthropod abundance in exotic *Eucalyptus* plantations in the Mediterranean. *Applied Ecology and Environmental Research*, 7(4): 297-301.
- Zambrano, L., Rodríguez-Palacios, S., Pérez-Escobedo, M., Gil-Alarcón, G., Camarena, P. y Lot, A. 2016. *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos*.

2a edición. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Zamorano, C. 2006. Alelopatía: un nuevo reto en la ciencia de las arvenses en el trópico. *Agronomía*, 14(1): 7-15.

Zar, J. H. 2014. *Biostatistical analysis*. 5a. edición. Pearson Education Limited, Harlow.

Zhang, D. J., Zhang, J., Yang, W. Q. y Wu, F. Z. 2010. Potential allelopathic effect of *Eucalyptus grandis* across a range of plantation ages. *Ecological Research*, 25(1): 13-23.

Zhang, K., Zheng, H., Chen, F. L., Ouyang, Z. Y., Wang, Y., Wu, Y. F., Lan, J., Fu, M. y Xiang, X. W. 2015. Changes in soil quality after converting *Pinus* to *Eucalyptus* plantations in southern China. *Solid Earth*, 6: 115–123.

Zhao, X., Yi, Q., Ding, N. y Xia, J. 2014. Changes in soil properties and quality for a *Eucalyptus* introduction area: a case study in Lancang country, Yunnan Province. *Journal of Residuals Science & Technology*, 11(4): 107–117.

ANEXO 1

Artículos relacionados con los efectos en el ambiente o sobre otros organismos causados por plantaciones de eucaliptos.

Temática	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Biodiversidad (plantas)	Experimento en campo Monitoreo de las características de comunidades vegetales	Determinar si la remoción experimental de hojarasca y ejemplares de eucalipto repercuten en la recuperación de la comunidad vegetal nativa.	No se encontraron diferencias significativas en las características de las comunidades vegetales sujetas a algunos de los tratamientos durante un monitoreo de 2 años.	Segura-Burciaga y Meave, 2001
Biodiversidad (aves y plantas)	Monitoreo en campo Avistamiento y muestreo de plantas en plantaciones de eucalipto y bosques nativos	Comparar la riqueza de especies de hierbas y la abundancia de aves entre parches de bosque nativo y plantaciones de eucalipto.	La riqueza de las comunidades vegetales y la abundancia de aves fueron más bajas en las plantaciones que en los bosques nativos.	Goded <i>et al.</i> , 2019
Biodiversidad (hongos)	Muestreo de suelo Análisis de laboratorio sobre la composición fisicoquímica del suelo Extracción de DNA de hongos micorrízicos presentes en las muestras de suelo	Conocer los cambios en la diversidad y composición de las comunidades fúngicas micorrízicas en plantaciones de eucalipto con diferentes edades.	La edad de las plantaciones y las características del suelo fueron elementos que influyeron en la modificación de la composición de las comunidades fúngicas, sin embargo no se presentan resultados concluyentes de causalidad en esta relación para todos los grupos de hongos.	Castaño <i>et al.</i> , 2019
Biodiversidad (mamíferos)	Monitoreo en campo Registro de avistamientos de ejemplares o vestigios de mamíferos	Conocer los efectos de la conversión parcial de una sabana en una plantación de eucaliptos sobre las comunidades de mamíferos medianos y grandes.	Menor riqueza de mamíferos en las plantaciones que en la sabana donde existe una mayor cantidad de recursos alimenticios para estos animales.	Coelho <i>et al.</i> , 2014
Biodiversidad (mamíferos)	Monitoreo en campo Registro de mamíferos en pastizales y plantaciones de eucaliptos con cámaras trampa	Evaluar el efecto de la sustitución de pastizales por plantaciones de eucalipto sobre la diversidad de mamíferos medianos y grandes.	Se redujo la riqueza de especies de mamíferos al reemplazar pastizales nativos por rodales de eucalipto, en particular sobre especies nativas especialistas.	Cravino y Brazeiro, 2021

Temática	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Biodiversidad (anfibios y reptiles)	Monitoreo en campo. Captura de anfibios y reptiles mediante el uso de vallas de deriva y trampas de caída.	Comparar la riqueza de especies de anfibios y reptiles de los pastizales nativos con la de plantaciones de eucaliptos.	La riqueza de anfibios y reptiles fue menor en la plantación que en los pastizales nativos.	Saccol <i>et al.</i> , 2017
Biodiversidad (artrópodos)	Monitoreo en campo. Captura macroartrópodos mediante el uso de trampas de caída.	Comparar la abundancia de macroartrópodos terrestres en plantaciones de eucalipto con la de cinco diferentes tipos de uso de suelo.	Se encontró que de los seis tipos de hábitats, las plantaciones jóvenes de eucaliptos albergan las más bajas abundancias de macroartrópodos terrestres.	Zahn <i>et al.</i> , 2009
Biodiversidad (hongos)	Monitoreo en campo. Colecta de cuerpos fructíferos de macromicetos.	Comparar la composición, diversidad y clasificación funcional de las comunidades de macromicetos de bosques nativos con las de plantaciones de una especie nativa y dos exóticas.	El bosque nativo alberga una mayor cantidad de cuerpos fructíferos de macrohongos que las plantaciones de eucalipto No se encontraron diferencias significativas en la diversidad de hongos entre tipos de hábitats. La clasificación funcional indica un alto grado de especialización de los hongos en los distintos tipos de hábitat.	Paz <i>et al.</i> , 2015
Suelo	Muestreo de suelo. Análisis de laboratorio sobre la composición química del suelo.	Conocer el efecto sobre la calidad bioquímica del suelo después de convertir plantaciones de <i>Pinus</i> a <i>Eucalyptus</i> y entre plantaciones sucesivas de <i>Eucalyptus</i> .	El índice de calidad de la composición química del suelo fue significativamente mayor en las plantaciones de pinos que en las de eucaliptos. Las plantaciones jóvenes de eucaliptos presentaron los valores más bajos en la mayoría de los rasgos químicos analizados.	Zhang <i>et al.</i> , 2015
Suelo	Muestreo de suelo. Análisis de laboratorio sobre la composición química del suelo.	Evaluar los cambios de las propiedades fisicoquímicas y la calidad del suelo en respuesta a la conversión de bosques secundarios nativos y bosques de pino a plantaciones de eucaliptos.	El índice de calidad del suelo se redujo en ambos tipos de hábitats después de su conversión a plantaciones de eucaliptos.	Zhao <i>et al.</i> , 2014

Anexo 1 (Continúa).

Temática	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Suelo y agua	Muestreo de suelo. Análisis de laboratorio sobre la composición fisicoquímica del suelo. Medición del rendimiento de cultivos de maíz.	Conocer el efecto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con los rendimientos de cultivo de maíz.	Los eucaliptos disminuyen la disponibilidad de recursos como luz, agua y nutrientes del suelo y reducen los rendimientos de los cultivos en plantaciones de maíz bordeadas por eucaliptos.	Chanie <i>et al.</i> , 2013
Agua	Experimento en vivero. Medición del uso eficiente de agua y crecimiento de plantas.	Comparar la eficiencia del uso del agua entre una planta nativa (<i>Tamarix aphylla</i>) y una especie exótica (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>) en dos medios de suelo diferentes.	Se presentó una mayor eficiencia en el uso del agua así como un mejor desarrollo morfológico y producción de biomasa por parte de <i>E. camaldulensis</i> en comparación con <i>T. aphylla</i> en ambos tratamientos.	Afzal <i>et al.</i> , 2018
Alelopatía	Experimentos en campo y vivero. Medición de tasas de supervivencia y rasgos de crecimiento de plantas.	Identificar y comparar los efectos alelopáticos sobre cuatro especies de árboles (<i>Acmena acuminatissima</i> , <i>Pterospermum lanceaefolium</i> , <i>Cryptocarya concinna</i> y <i>Albizia lebbek</i>) en plantaciones de <i>Eucalyptus</i> y <i>Pinus elliottii</i> .	De manera general en los tres experimentos, las especies nativas presentaron una disminución en las tasas de supervivencia y rasgos de crecimiento de las plántulas respecto a la especie introducida en las plantaciones de eucalipto.	Chu <i>et al.</i> , 2014
Alelopatía	Experimento en vivero. Medición de germinación y rasgos de crecimiento de plantas.	Probar si los efectos alelopáticos bajo condiciones controladas observados en otras publicaciones se presentaban en entornos más parecidos al medio natural.	De manera general no hubo diferencias significativas en la germinación pero se presentaron efectos negativos en los rasgos de crecimiento de las especies analizadas en los tratamientos con mayor cantidad de hojarasca suministrada.	Ahmed <i>et al.</i> , 2018

Temática	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Alelopatía	Experimento en laboratorio. Identificación de compuestos alelopáticos. Medición de germinación y rasgos de crecimiento de plantas.	Identificar los efectos alelopáticos de las raíces y la rizósfera en plantaciones de eucalipto de diferentes edades.	Se identificaron una gran cantidad de compuestos potencialmente alelopáticos en los extractos de raíz y rizósfera de los eucaliptos. Se observaron efectos inhibitorios sobre el crecimiento de las especies objetivo (<i>Raphanus sativus</i> , <i>Phaseolus aureus</i> y <i>Lolium perenne</i>) en particular en las plantaciones jóvenes.	Zhang <i>et al.</i> , 2010
Alelopatía	Experimento en laboratorio. Análisis del crecimiento, la reproducción y la preferencia alimenticia de microorganismos.	Conocer el efecto de los aceites esenciales de las hojas de <i>E. globulus</i> sobre el crecimiento, la reproducción y la preferencia alimenticia de microorganismos.	Se encontró un bajo crecimiento fúngico en concentraciones de aceites relativamente bajas. La reproducción de colémbolos no se vio afectada por los aceites a excepción de la administración de la dosis más alta. En el experimento de consumo alimentario, tanto el colémbolo <i>F. candida</i> como el isópodo <i>P. dilatatus</i> mostraron una preferencia por alimento sin aceites impregnados.	Martins <i>et al.</i> , 2013

ANEXO 2

Lista de trabajos relacionados con los efectos de los eucaliptos dentro de la REPSA desarrollados por el Laboratorio de Interacciones y Procesos Ecológicos de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Título	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Restauración Ecológica de la Zona de Amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F. (México)	Monitoreo de vegetación	Determinar los cambios en la estructura de la comunidad vegetal en un área durante todo el proceso de implementación de acciones de restauración ecológica. *Incluye el retiro de eucaliptos.	Se observó un incremento de la cobertura relativa de especies nativas tras las acciones de restauración en la zona A8.	Antonio-Garcés, 2008
Monitoreo de las actividades de la fauna de vertebrados en dos zonas sujetas a restauración en la Reserva del Pedregal de San Ángel, D.F. (México)	Monitoreo de fauna	Conocer la fauna de vertebrados y sus actividades en dos zonas sujetas a acciones de restauración en la REPSA. *Incluye el retiro de eucaliptos.	La zona A11 presentó una mayor similitud respecto a A11 en cuanto a la composición de aves, vertebrados y vertebrados nativos con la zona conservada. Se encontró que la zona A11 es utilizada como sitio de percha y anidamiento así como proveedora de recursos para la alimentación de los vertebrados.	San José-Alcalde, 2010
Cambios de la vegetación y la fauna de un pedregal sometido a restauración ecológica en el centro de México	Monitoreo de vegetación y fauna	Analizar el proceso de recuperación de la vegetación y la fauna de dos sitios de la REPSA sometidos a dos procesos contrastantes de restauración ecológica. *Incluye el retiro de eucaliptos.	La zona A8 presenta una recuperación en las comunidades vegetales nativas así como en varios de los componentes faunísticos después de las acciones de restauración. En tanto que A11 no ha presentado mejoras en estos rasgos lo cual se ha asociado a la falta de recuperación del sustrato original.	Cano-Santana <i>et al.</i> , 2010
Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de artrópodos durante un proceso de restauración ecológica en el área de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F.	Monitoreo de vegetación y fauna	Conocer la estructura y composición de la comunidad vegetal y la abundancia de dos poblaciones de artrópodos: <i>S. purpurascens</i> y <i>N. oaxacensis</i> , en el área noreste de la zona de amortiguamiento 8 de la REPSA *Incluye el retiro de eucaliptos.	La cobertura de plantas exóticas se redujo a partir del retiro de eucaliptos pero otras especies mantienen su presencia, a pesar de ello la diversidad de especies vegetales se ha incrementado. La densidad de los artrópodos muestreados fue más alta en A8 que en la zona conservada, algunos de ellos son especies asociadas a sitios perturbados.	Saucedo-Morquecho, 2011

Título	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Efecto de cinco años de restauración sobre la comunidad vegetal y dos poblaciones de artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel	Monitoreo de vegetación y fauna	Conocer la estructura de la comunidad vegetal y la densidad del chapulín <i>Sphenarium purpurascens</i> y de la araña <i>Neoscona oaxacensis</i> en el noreste del área de amortiguamiento A8 de la REPSA después de cinco años de acciones de restauración ecológica. *Incluye el retiro de eucaliptos.	Las especies de plantas exóticas han sido dominantes en A8 durante los 5 años de monitoreo. Se encontraron densidades significativamente mayores de chapulines en el sitio A8 que en la zona conservada, mientras que no hubo diferencias en las densidades de arañas.	Muñoz-Saavedra, 2013
La comunidad vegetal y abundancia de dos artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel tras cuatro años de acciones de restauración.	Monitoreo de vegetación y fauna	Conocer los cambios en la estructura de la comunidad vegetal y en el tamaño poblacional de <i>Sphenarium purpurascens</i> y de <i>Neoscona oaxacensis</i> en el área de amortiguamiento A8 “Biológicas” en la REPSA después de haber estado sujeta a cuatro años de acciones de restauración ecológica. *Incluye control de eucaliptos.	Las especies de plantas exóticas han reducido su cobertura al interior de A8. Se encontraron densidades significativamente mayores de chapulines y arañas en el sitio A8 que en la zona conservada.	Ayala, 2014
Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de animales importantes en el NE de la zona de amortiguamiento 8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel en respuesta a acciones de restauración ecológica.	Monitoreo de vegetación y fauna	Comparar la estructura de la comunidad vegetal, el desempeño (supervivencia y crecimiento) de plántulas de especies nativas introducidas y el tamaño poblacional de dos especies de animales nativos, el chapulín <i>Sphenarium purpurascens</i> y el ratón piñonero <i>Peromyscus gratus</i> que presentó entre 2006 y 2007 la zona NE del área de amortiguamiento 8 sujeta a acciones de restauración desde abril de 2005. *Incluye el retiro de eucaliptos.	Se presentó un aumento en la cobertura de especies nativas al interior de A8. La densidad de los chapulines varía entre sitios en función de la temporada de muestreo. Se registró una mayor densidad de roedores asociados a actividades antrópicas en A8 que en la zona conservada.	Peña-Mendoza, 2016

Título	Tipo de estudio	Objetivo	Resultado	Referencia
Estructura y composición de la comunidad vegetal de dos sitios sujetos a acciones de restauración durante el periodo 2005-2012 en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México	Monitoreo de vegetación	<p>Evaluar la idoneidad, efectividad, viabilidad, aplicabilidad y replicabilidad de las acciones de restauración llevadas a cabo en las áreas A8 y A11 de la REPSA desde el 2005.</p> <p>*Incluye el retiro de eucaliptos.</p>	<p>Después de las acciones de restauración incrementó la diversidad de las comunidades de los sitios A8 y A11 así como la dominancia de especies nativas y se redujo la presencia de exóticas.</p> <p>Después de 10 años de actividades de restauración en A8 y A11 existen aún diversos factores, principalmente de origen antrópico que limitan la regeneración de las características naturales de ambos sitios.</p>	González-Jaramillo, 2018
Respuesta de la comunidad vegetal a la remoción de eucaliptos con fines de restauración en la zona A2 de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México	Monitoreo de vegetación	<p>Analizar la respuesta de la comunidad vegetal a programas de restauración ecológica que incluyen como acción principal la tala de eucaliptos en la Zona de Amortiguamiento A2 de la REPSA.</p>	<p>Después de la remoción de eucaliptos en la zona de restauración al interior de A2 la dominancia de las especies nativas incrementó.</p> <p>La zona en restauración en A2 muestra una mayor similitud en los componentes vegetales con las zonas conservadas sin eucaliptos aunque no alcanza a parecerse a una zona núcleo.</p>	Morelos-Rebollar, 2019
Estructura de la comunidad de aves y redes planta-ave en zonas sujetas a restauración y conservadas de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México.	Monitoreo de fauna	<p>Comparar la estructura de la comunidad de aves y los rasgos de las interacciones planta-ave entre zonas conservadas y cuatro zonas sujetas a restauración ecológica en la REPSA.</p> <p>*Incluye el retiro de eucaliptos.</p>	<p>Las zonas conservadas presentaron en general riqueza e índices de diversidad menores a los de las zonas sujetas a restauración debido a la poca variabilidad espacial con la que cuentan, que representa a su vez una menor disponibilidad de espacios para el forrajeo, anidación y sitios de refugio.</p>	Figueroa-Aquino, 2020

ANEXO 3

Lista de especies vegetales asociadas a los cuatro microcosmos en la REPSA, Ciudad de México. Datos de los muestreos de lluvias de 2020 y secas de 2021. NA: nativa arvense, NnA: nativa no arvense, E: exótica.

Especie	Familia	Forma de vida	Tipo
<i>Aegopogon tenellus</i>	Poaceae	terofita	NA
<i>Agave salmiana</i>	Agavaceae	fanerofita	NnA
<i>Ageratina petiolaris</i>	Asteraceae	fanerofita	NnA
<i>Archibaccharis serratifolia</i>	Asteraceae	camefita	NA
<i>Arracacia toluensis</i>	Apiaceae	criptofita	NA
<i>Asclepias linaria</i>	Asclepidaceae	fanerofita	NA
<i>Begonia gracilis</i>	Begoniaceae	criptofita	NnA
<i>Bidens pilosa</i>	Asteraceae	terofita	NA
<i>Bidens</i> sp.	Asteraceae	terofita	NA
<i>Bouvardia ternifolia</i>	Rubiaceae	fanerofita	NA
<i>Buddleja sessiliflora</i>	Scrophulariaceae	fanerofita	NA
<i>Bursera fagaroides</i>	Burseraceae	fanerofita	NnA
<i>Calliandra grandiflora</i>	Mimosaceae	camefita	NnA
<i>Calochortus barbatus</i>	Calochortaceae	criptofita	NA
<i>Cardiospermum halicacabum</i>	Sapindaceae	hemcriptofita	NA
<i>Cissus sicyoides</i>	Vitaceae	camefita	NnA
<i>Clematis dioica</i>	Ranunculaceae	-	NA
<i>Commelina coelestis</i>	Commelinaceae	hemcriptofita	NA
<i>Commelina diffusa</i>	Commelinaceae	hemcriptofita	NA
<i>Commelina tuberosa</i>	Commelinaceae	hemcriptofita	NnA
<i>Conyza</i> sp.	Asteraceae	terofita	NA
<i>Crusea longiflora</i>	Rubiaceae	terofita	NA
<i>Cyperus</i> sp.	Cyperaceae	criptofita	NnA
<i>Dahlia coccinea</i>	Asteraceae	criptofita	NA
<i>Desmodium aparines</i>	Fabaceae	hemcriptofita	NnA
<i>Desmodium grahamii</i>	Fabaceae	hemcriptofita	NnA
<i>Dioscorea galeottiana</i>	Dioscoreaceae	criptofita	NnA
<i>Echeveria gibbiflora</i>	Crassulaceae	camefita	NnA
<i>Gaudichaudia cynanchoides</i>	Malpighiaceae	hemcriptofita	NnA
<i>Geranium seemannii</i>	Geraniaceae	hemcriptofita	NA
<i>Gibasis linearis</i>	Commelinaceae	criptofita	NnA
<i>Govenia superba</i>	Orchidaceae	criptofita	NnA
<i>Habenaria novemfida</i>	Orchidaceae	criptofita	NnA
<i>Habranthus concolor</i>	Amaryllidaceae	criptofita	NnA
<i>Ipomoea</i> sp.	Convolvulaceae	terofita	NA
<i>Iresine cassiniiformis</i>	Amaranthaceae	fanerofita	NnA
<i>Lepidium virginicum</i>	Brassicaceae	terofita	NA
<i>Loeselia mexicana</i>	Polemoniaceae	camefita	NA

Anexo 1 (Continúa)

Especie	Familia	Forma de vida	Tipo
<i>Malaxis</i> sp.	Orchidaceae	criptofita	NnA
<i>Mammillaria magnimamma</i>	Cactaceae	camefita	NnA
<i>Manfreda scabra</i>	Agavaceae	hemcriptofita	NnA
<i>Melinis repens</i>	Poaceae	hemcriptofita	E
<i>Metastelma angustifolium</i>	Asclepidaceae	camefita	NnA
<i>Milla biflora</i>	Alliaceae	criptofita	NA
<i>Mirabilis jalapa</i>	Nyctaginaceae	hemcriptofita	NA
<i>Montanoa tomentosa</i>	Asteraceae	fanerofita	NA
<i>Muhlenbergia robusta</i>	Poaceae	camefita	NnA
<i>Oplismenus</i> sp.	Poaceae	-	-
<i>Opuntia robusta</i>	Cactaceae	fanerofita	NnA
<i>Opuntia</i> sp.	Cactaceae	fanerofita	NnA
Orquidea	Orchidaceae	criptofita	NnA
<i>Passiflora subpeltata</i>	Passifloraceae	hemcriptofita	NA
<i>Peperomia campyloptropa</i>	Piperaceae	criptofita	NA
<i>Piqueria trinervia</i>	Asteraceae	hemcriptofita	NA
<i>Pittocaulon praecox</i>	Asteraceae	fanerofita	NnA
<i>Plumbago pulchella</i>	Plumbaginaceae	camefita	NnA
<i>Portulaca pilosa</i>	Portulacaceae	hemcriptofita	NA
<i>Pseudognaphalium</i> sp.	Asteraceae	hemcriptofita	NA
<i>Sagina procumbens</i>	Caryophyllaceae	-	-
<i>Salvia mexicana</i>	Lamiaceae	hemcriptofita	NA
<i>Salvia tiliifolia</i>	Lamiaceae	hemcriptofita	NA
<i>Sedum oxypetalum</i>	Crassulaceae	fanerofita	NnA
<i>Selaginella lepidophylla</i>	Sellaginaceae	criptofita	NnA
<i>Setaria parviflora</i>	Poaceae	hemcriptofita	NA
<i>Solanum nigrescens</i>	Solanaceae	terofita	NA
<i>Solanum</i> sp.	Solanaceae	terofita	NA
<i>Stevia lucida</i>	Asteraceae	hemcriptofita	NnA
<i>Stevia ovata</i>	Asteraceae	hemcriptofita	NnA
<i>Stevia</i> sp.	Asteraceae	hemcriptofita	NnA
<i>Stevia viscida</i>	Asteraceae	hemcriptofita	NnA
<i>Tagetes lunulata</i>	Asteraceae	terofita	NA
<i>Tagetes micrantha</i>	Asteraceae	terofita	NnA
<i>Tigridia pavonia</i>	Iridaceae	criptofita	NnA
<i>Tinantia erecta</i>	Commelinaceae	terofita	NA
<i>Triphora triantophora</i>	Orchidaceae	criptofita	NnA
<i>Tripsacum dactyloides</i>	Poaceae	camefita	NnA
<i>Verbesina virgata</i>	Asteraceae	fanerofita	NnA
<i>Wigandia urens</i>	Boraginaceae	fanerofita	NA