

Restauración de pastizales en canteras de conchilla en los talares del este de Buenos Aires: Un estudio de caso

CAROLINA A. PÉREZ[✉]; MAGALÍ PÉREZ FLORES & MARCELO F. ARTURI

Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), FCAyF, FCNyM, Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires.

RESUMEN. Agregar suelo en ecosistemas degradados por actividades mineras puede mejorar condiciones edáficas y aportar semillas, lo cual favorece la recuperación de la vegetación; sin embargo, el pastoreo puede afectar negativamente ese proceso. Los talares sobre cordones de conchilla están conformados por bosques de *Celtis tala* y pastizales con especies típicas de la ecorregión Pampa. Las canteras de conchilla afectan a estos ecosistemas. Se evaluó el efecto de adicionar suelo y excluir el pastoreo en una cantera recientemente abandonada. Se estimó la cobertura y la composición de herbáceas durante cinco años en: 1) cantera con agregado de suelo y sin pastoreo ('Cantera Ensayo+S'); 2) cantera sin agregado de suelo y sin pastoreo ('Cantera Ensayo'), y 3) sector adyacente, no intervenido por minería y con pastoreo ('Cordón Ensayo'). La vegetación en Cantera Ensayo+S alcanzó tempranamente una cobertura total similar a la de Cordón Ensayo y fue mayor que en Cantera Ensayo. También se evaluó la composición florística en un solo momento en otras canteras abandonadas, sin agregado de suelo ('Otras Canteras') y en pastizales sobre otros cordones sin intervención minera ('Otros Cordones'), todos con pastoreo. Se observaron diferencias de composición florística entre canteras sin agregado de suelo (Cantera Ensayo, Otras Canteras) y cordones no intervenidos por minería (Cordón Ensayo, Otros Cordones). Inicialmente, Cantera Ensayo+S presentó una composición florística similar a Cantera Ensayo y Otras Canteras, y hacia el final de los muestreos fue similar a la de los cordones sin intervención minera. El agregado de suelo más la exclusión del ganado aceleraron la recuperación de la cobertura herbácea y la composición florística, alcanzando características similares a las de los cordones sin intervención minera. Estas prácticas de restauración favorecerían la recuperación de pastizales degradados por minería y representarían una fuente de semillas para otros sectores no tratados, como una estrategia ecológica y económicamente viable.

[Palabras clave: bosques de *Celtis tala*, pastoreo, minería, conservación]

ABSTRACT. Restoration of grasslands in shell quarries in the talares of the east of Buenos Aires: A case study. The addition of topsoil to ecosystems affected by mining can improve soil conditions and contribute to the seed bank, favoring the recovery of vegetation, but grazing can negatively affect this process. The 'talares' develop on the shell banks in the east of Buenos Aires and constitute a combination of forests dominated by *Celtis tala* and grasslands with species typical of the Pampa ecoregion. These ecosystems are affected by shell quarries. The effect of grazing exclusion with or without topsoil addition in an abandoned quarry was evaluated. The herbaceous cover and species composition were estimated for five years in the quarry free from grazing with and without soil addition ('Cantera Ensayo+S' and 'Cantera Ensayo', respectively) and in a grazed grassland on the same grazed cliff unaffected by mining ('Cordón Ensayo'). The total plant cover in Cantera Ensayo+S was similar to that of Cordón Ensayo, few months after abandonment and was greater than that of Cantera Ensayo. Floristic composition was also evaluated once in grazed grasslands on other unaffected shell banks by mining ('Otros Cordones') and other abandoned quarries without soil addition ('Otras Canteras'). Clear differences in species composition were observed between mining-affected (Cantera Ensayo and Otras Canteras) and unaffected grasslands (Cordón Ensayo and Otros Cordones). The species composition of Cantera Ensayo+S was similar to that of mining-affected sites at the beginning of the sampling, but became closely similar to that of unaffected sites over time. In few years, abandoned quarries with topsoil addition and grazing exclusion can reach similar total plant cover, and species composition to that of unaffected sites. These treated areas can act as a seed source, facilitating the colonization of nearby abandoned untreated quarries. Thus, ecologically and economically viable restoration strategies could be employed.

[Keywords: *Celtis tala* forest, grazing, mining, conservation]

INTRODUCCIÓN

La degradación de los ecosistemas como resultado del uso de la tierra afecta una importante proporción de la superficie terrestre, con la consecuente pérdida de hábitats, de biodiversidad y de servicios de regulación ambiental (Modernel et al. 2016). La restauración ecológica, definida como el proceso basado en promover el restablecimiento de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (SER 2004), ha probado ser una estrategia exitosa para recuperar la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos (Jones and Schmitz 2009; Barral et al. 2015). Las prácticas requeridas para la restauración ecológica dependen en gran medida de los parámetros de referencia considerados y del grado de deterioro del sitio a restaurar (Prach et al. 2020). En sitios degradados con fuertes limitaciones de fertilidad del suelo, adicionar de suelo superficial puede acelerar los tiempos de recuperación de la cobertura y la composición de la vegetación. Agregar materiales finos al suelo mejora parámetros edáficos relacionados con la fertilidad del suelo (Chenot et al. 2017, 2018; Kneller et al. 2018) y aporta al banco de semillas y a la biota del suelo (Van der Bij et al. 2018). A su vez, el pastoreo del ganado doméstico también afecta la cobertura y la composición específica y funcional de la vegetación, y su supresión representa una medida adecuada de restauración de pastizales (Loydi 2019).

En cercanías de la costa del Río de La Plata se desarrollan los talares, que constituyen una combinación de bosques sobre cordones de conchilla, dominados por tala (*Celtis tala* Gillies ex Planch.), y pastizales en diferentes posiciones topográficas, representando un sistema ecológico con alto valor de conservación (Arturi and Goya 2004; Torres Robles and Arturi 2009). Por un lado, los talares han experimentado procesos de degradación asociados a la ganadería, a la expansión urbana y, principalmente, a la extracción de materiales calcáreos del subsuelo (Arturi and Goya 2004). Las canteras de conchilla en las costas del Río de La Plata, establecidas para extraer materiales calcáreos de los cordones, remueven el horizonte superficial del suelo, lo que provoca la eliminación de la vegetación y del banco de semillas, la alteración del relieve positivo que caracteriza a los cordones de conchilla y la pérdida de fertilidad y buen drenaje de sus suelos (Arturi and Goya 2004; Carol et al. 2014; Plaza Behr et al. 2021). En

las canteras abandonadas, la mayor parte de la superficie está ocupada por el material residual de la explotación, que consiste en una mezcla de arena y conchilla sobre la que se desarrolla una cobertura herbácea expuesta generalmente al pastoreo continuo por ganado doméstico. Por el otro, en los pastizales sobre los cordones de conchilla predominan especies asociadas al pastoreo, muchas de ellas exóticas, pero también se encuentran especies propias del flechillar pampeano (Vervoort 1967; Arturi et al. 2006; Torres Robles 2009). En ese sentido, estas áreas representan refugios para la vegetación al haber sido menos alteradas por los cultivos agrícolas o por la siembra de especies forrajeras, que producen profundos cambios en su composición florística y afectan las posibilidades de recuperación (Burkart et al. 2011; Rodríguez and Jacobo 2013).

Planificar estrategias de restauración ecológica en las canteras de conchilla requiere conocer las tendencias sucesionales espontáneas y contrastarlas con la respuesta de la vegetación frente a intervenciones que incluyen la adición de material superficial del suelo y la supresión del pastoreo (Řehounková and Prach 2010; Prach et al. 2020). Sin embargo, no existen antecedentes al respecto en el área de estudios. El agregado de material superficial del suelo aceleraría la recuperación de la cobertura y la composición de la vegetación, ya que se espera que mejore las condiciones de fertilidad del suelo, sumadas al potencial aporte de semillas presentes en el suelo adicionado (Chenot et al. 2017, 2018; Kneller et al. 2018; Van der Bij et al. 2018). A su vez, suprimir el pastoreo evitaría efectos negativos de este disturbio, tales como la reducción de la cobertura vegetal y el consumo selectivo de especies preferidas (Loydi 2019).

Las operaciones de movimiento de suelo en las canteras y la exclusión del ganado resultan costosas y requieren del consentimiento y la participación de quienes llevan a cabo la explotación, por lo que no se las suele realizar. En consecuencia, en este trabajo se evalúan los efectos de tratamientos de restauración establecidos en una sola cantera y se comparan con cordones no intervenidos y canteras no tratadas.

Sobre la base de los antecedentes, se plantea como hipótesis que luego del cese de actividades, la recuperación de la cobertura y composición de la vegetación herbácea en una cantera de conchilla está limitada por la alteración del sustrato, la eliminación

del banco de semillas y los efectos adversos del pastoreo. Se predice que la adición de material superficial del suelo conducirá hacia una cobertura y composición de la vegetación herbácea similar a la de los cordones no intervenidos. Este proceso de recuperación de la cobertura y composición de la vegetación será favorecido por la exclusión del ganado. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) cuantificar las diferencias en la cobertura total y la riqueza de especies de la vegetación entre el pastizal de un cordón sin intervención minera respecto de los pastizales que se establecieron con supresión de pastoreo y con adición de material superficial o sin él, y 2) evaluar diferencias en la composición florística entre pastizales en cordones de conchilla no intervenidos por la actividad minera y canteras bajo diferentes estrategias de restauración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en la localidad Cerro de la Gloria (35°56'34.26" S - 57°26'46.61" O), partido de Castelli, en el sector sur de la distribución de los talares de la provincia de Buenos Aires (Torres Robles and Arturi 2009) (Figura 1). El área de talares estudiada se encuentra enmarcada dentro de la Depresión del Salado (Bs. As.), cuyo clima es templado, húmedo, con una temperatura media anual que varía entre 15 y 17 °C y una precipitación anual de entre 850 y 1065 mm (Burgos 1968). Las precipitaciones se distribuyen a lo largo de todo el año, aunque una característica distintiva de la región es la alternancia periódica de inundaciones y sequías estivales (Vervoort 1967; Burgos 1968). Los suelos tienen un desarrollo incipiente, con un horizonte A oscuro que se asienta sobre un horizonte de transición AC o directamente sobre la conchilla (Giménez et al. 2008). El horizonte superficial de los talares presenta 20 a 30 cm de espesor, una textura franca a franco-arenosa, con un 12% de materia orgánica (Sánchez et al. 1976). En los bosques de tala sobre cordones de conchilla, las principales especies leñosas nativas que integran el estrato arbóreo son tala, coronillo (*Scutia buxifolia* Reissek), molle (*Schinus longifolia* [Lindl.] Speng.) y sombra de toro (*Jodina rhombifolia* [Hook. and Arn.] Reissek), que se presentan en combinaciones de especies y densidades variables (Arturi and Goya 2004). Los pastizales sobre los cordones de conchilla se caracterizan por la presencia

de las gramíneas nativas *Bothriochloa laguroides* (DC.) Herter, *Nassella neesiana* (Trin. and Rupr.) Barkworth, *Jarava plumosa* (Spreng.) S. W. L. Jacobs y J. Everett, *Piptochaetium montevidense* (Spreng.) Parodi, *P. bicolor* (Vahl) E. Desv. y *Paspalum dilatatum* Poir. var. *dilatatum*, entre otras (Cabrera 1949; Torres Robles 2009).

Sitios de muestreo

En este trabajo se analizaron estrategias de restauración cuyas posibilidades de replicación están limitadas por su disponibilidad en el área de estudios. Se llevaron a cabo censos de la composición florística y cobertura de la vegetación en una cantera cuya explotación cesó en junio de 2012, seis meses antes del inicio de los muestreos. Sobre el mismo cordón donde se ubicó la cantera se realizaron muestreos en tres situaciones diferentes: 1) en un sector de la cantera reciente en el que se clausuró al pastoreo y se agregó material superficial del suelo, denominado 'Cantera Ensayo+S'. Ese sector de la cantera, de ~0.5 ha, se niveló con máquina niveladora y se distribuyó el material superficial del suelo que había sido retirado antes de la extracción de conchilla. Este estrato alcanzó profundidades entre 5 y 35 cm sobre el material residual de la explotación; 2) en otro sector de la misma cantera, sin pastoreo y sin agregado de material superficial del suelo, que se denominó 'Cantera Ensayo', y 3) en un sector del mismo cordón, no intervenido por la actividad minera ('Cordón Ensayo'), con presencia de ganado vacuno y equino. En Cantera Ensayo+S y Cantera Ensayo, la exclusión al pastoreo se implementó mediante el uso de boyero eléctrico. Estos sitios se muestrearon en noviembre de 2012, febrero de 2013, diciembre de 2014, diciembre de 2016 y marzo de 2017. En Cantera Ensayo, el muestreo comenzó en diciembre de 2014 debido a que antes, la cobertura de la vegetación era nula o muy escasa. Además, en febrero de 2013 se llevaron a cabo determinaciones de cobertura y composición florística en dos canteras abandonadas más de tres años antes del muestreo, sin adición de material superficial del suelo, que fueron denominadas 'Otras Canteras', así como en tres sitios de pastizal sobre cordones no intervenidos por minería, denominados 'Otras Cordones'. Todos estos sitios se muestrearon en una sola oportunidad, se encontraban bajo un régimen de pastoreo continuo y se localizaron entre 1 y 24 km de distancia respecto de los sitios muestreados en la cantera donde se realizaron los ensayos con adición y sin adición de material superficial

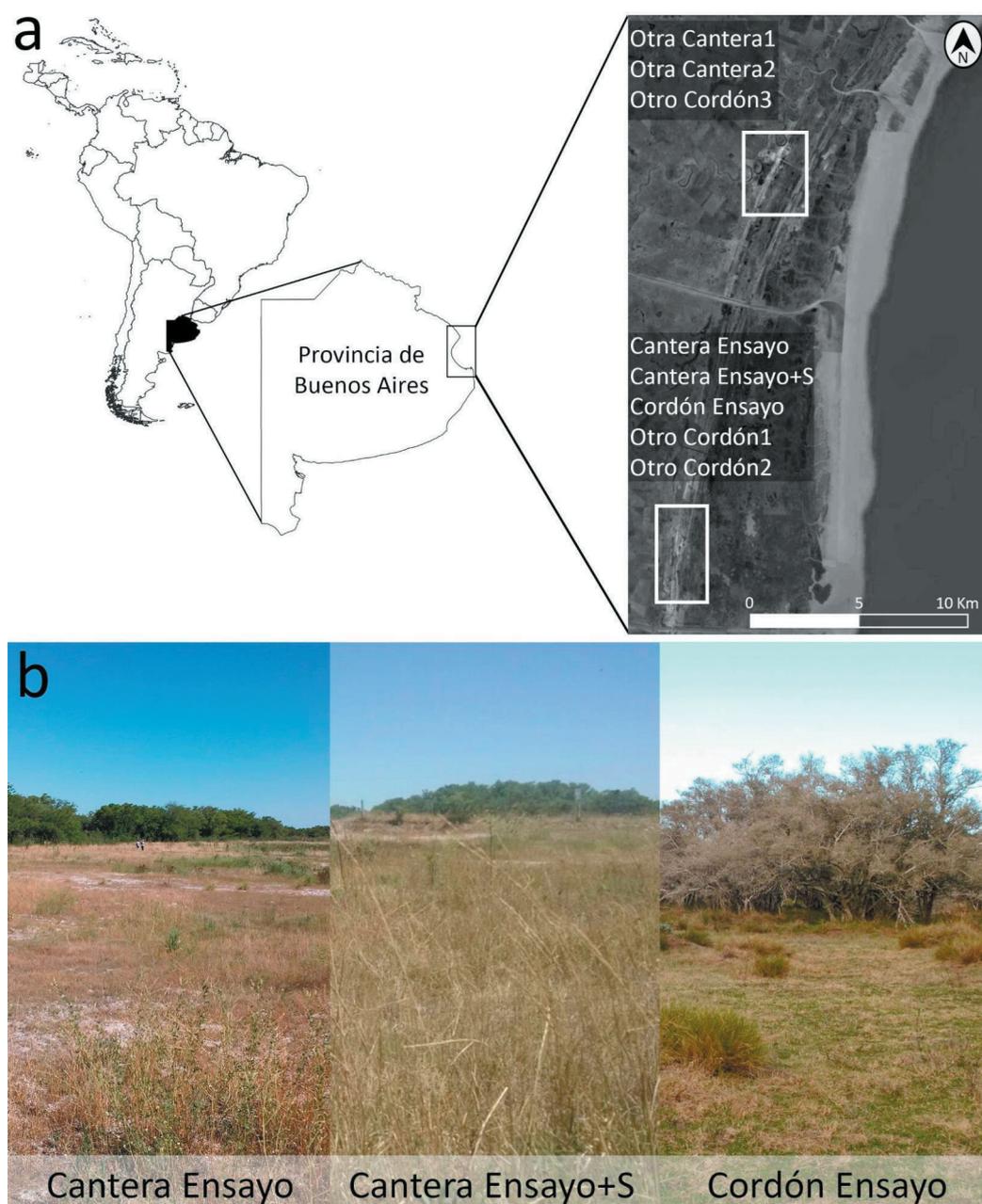


Figura 1. (a) Ubicación de los sitios de muestreo. Imagen satelital extraída de Google Earth™ (Landsat/Copernicus 2020, observada 1 de noviembre de 2021). Cantera Ensayo+S: cantera reciente con agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cantera Ensayo: cantera reciente sin agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cordón Ensayo: cordón sin actividad minera adyacente a Cantera Ensayo+S y Cantera Ensayo y con pastoreo; Otra Cantera1 y Otra Cantera2: canteras abandonadas más de tres años antes del muestreo, sin agregado de material superficial del suelo y con pastoreo; Otro Cordón1, Otro Cordón2 y Otro Cordón3: otros cordones sin actividad minera y con pastoreo. (b) Fotos de Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo (diciembre de 2016) y Cordón Ensayo (septiembre de 2016).

Figure 1. (a) Location of sampling sites. Google Earth™ satellite image (Landsat/Copernicus 2020, seen on 1 November 2021). Cantera Ensayo+S: recent quarry with added topsoil and without grazing; Cantera Ensayo: recent quarry without added topsoil and without grazing; Cordón Ensayo: shell bank without mining activity adjacent to Cantera Ensayo+S and Cantera Ensayo, and with grazing; Otra Cantera1 and Otra Cantera2: quarries, abandoned three years before sampling, without added topsoil and with grazing; Otro Cordón1, Otro Cordón2 and Otro Cordón3: other shell banks without mining activity and with grazing. (b) Photos from Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo (December 2016) and Cordón Ensayo (September 2016).

del suelo (Figura 1). En cada uno de los sitios muestreados se realizaron 10 a 22 censos, en cada fecha mencionada, comprendiendo un total de 245 censos (Tabla 1). Para dar cumplimiento al objetivo (1) se emplearon los datos provenientes de los muestreos realizados en los sitios Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cordón Ensayo y para el objetivo (2) se tuvieron en cuenta todos los sitios muestreados.

Cobertura y composición de la vegetación

En cada sitio y fecha de muestreo se estimó la composición y cobertura de especies herbáceas en 3 a 5 transectas paralelas entre sí, con rumbo E-O. Sobre cada transecta, cada 7 m de distancia, se ubicaron parcelas circulares de 1 m de diámetro. La cobertura por especie se estimó mediante el método de Braun-Blanquet (Matteucci and Colma 1982). Cada una de estas parcelas se corresponde con un censo. A cada una de las especies presentes en cada parcela se le asignó visualmente un valor de cobertura-abundancia de acuerdo con la siguiente escala: 0-5%, 5-10%, 10-25%, 25-50%, 50-75% y 75-100%. Las especies halladas se colectaron y herborizaron para su posterior identificación en el laboratorio mediante el uso de lupa binocular y claves dicotómicas. La

nomenclatura de las especies se estableció de acuerdo con Zuloaga et al. (1994) y Zuloaga y Morrone (1996, 1999). A cada especie, en cada sitio y fecha de muestreo se le asignó un valor de cobertura utilizando el valor medio del rango de cobertura-abundancia.

Análisis de datos

En relación con el objetivo (1), se compararon las diferencias de cobertura total de la vegetación herbácea (100-% de suelo desnudo) entre las situaciones localizadas sobre el mismo cordón de la cantera tratada: Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cordón Ensayo. Dada la naturaleza ordinal de la variable estimada visualmente mediante la escala de Braun-Blanquet, se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman, tomando como factores a las situaciones arriba detalladas y a la fecha de muestreo, controlando así la variación temporal. En cada fecha se tomó el promedio de las parcelas de cada sitio. Teniendo en cuenta que el agregado de material superficial del suelo debería mejorar la cobertura herbácea respecto de la situación sin agregado, se pusieron a prueba solo dos hipótesis con respecto a la cobertura total, establecidas como comparaciones *a priori*: 1) Cantera Ensayo < Cantera Ensayo+S, y 2)

Tabla 1. Número de censos realizados en los sitios de pastizal relevados en diferentes fechas (Nov-12: noviembre de 2012, Feb-13: febrero de 2013, Dic-14: diciembre de 2014, Dic-16: diciembre de 2016 y Mar-17: marzo de 2017). Se indica la presencia o ausencia de pastoreo y la adición o no de material superficial del suelo (+Suelo). Cantera Ensayo+S: cantera reciente con agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cantera Ensayo: cantera reciente sin agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cordón Ensayo: cordón sin actividad minera adyacente a Cantera Ensayo+S y Cantera Ensayo y con pastoreo; Otra Cantera1 y Otra Cantera2: canteras abandonadas más de tres años antes del muestreo, sin agregado de material superficial del suelo y con pastoreo; Otro Cordón1, Otro Cordón2 y Otro Cordón3: otros cordones sin actividad minera y con pastoreo.

Table 1. Census numbers carried out in the grassland sites surveyed on different dates (Nov-12: November 2012, Feb-13: February 2013, Dic-14: December 2014, Dic-16: December 2016 and Mar-17: March 2017). Grazing activity and topsoil addition (+Suelo) are indicated. Cantera Ensayo+S: recent quarry with added topsoil and without grazing; Cantera Ensayo: recent quarry without added topsoil and without grazing; Cordón Ensayo: shell bank without mining activity adjacent to Cantera Ensayo+S and Cantera Ensayo, and with grazing; Otra Cantera1 and Otra Cantera2: quarries, abandoned three years before sampling, without added topsoil and with grazing; Otro Cordón1, Otro Cordón2 and Otro Cordón3: other shell banks without mining activity and with grazing.

Pastoreo	+Suelo	Sitio	Nov-12	Feb-13	Dic-14	Dic-16	Mar-17
No	Si	Cantera Ensayo+S	22	22	11	11	10
No	No	Cantera Ensayo	-	-	13	18	17
Si	No	Cordón Ensayo	21	20	10	10	10
Si	No	Otra Cantera1		10			
Si	No	Otra Cantera2		10			
Si	No	Otro Cordón1		10			
Si	No	Otro Cordón2		10			
Si	No	Otro Cordón3		10			

Cantera Ensayo < Cerdón Ensayo. Para dichas comparaciones se usaron pruebas unilaterales. El mismo análisis se utilizó para evaluar las diferencias en la riqueza de especies entre Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cerdón Ensayo, a lo largo de las fechas de muestreo. También se estimó la riqueza acumulada para estos sitios.

En relación con el objetivo (2), para comparar la composición florística, los sitios fueron agrupados en: 1) cantera con agregado de material superficial del suelo (todas las fechas de Cantera Ensayo+S); 2) canteras sin agregado de material superficial del suelo (todas las fechas de Cantera Ensayo, Otra Cantera1 y Otra Cantera2), y 3) pastizales sobre cordones no intervenidos por minería (Cerdón Ensayo, Otro Cerdón1, Otro Cerdón2 y Otro Cerdón3). Se llevó a cabo un análisis de coordenadas principales (PCO) a partir de los datos de cobertura-abundancia por especie de todos los sitios y todas las fechas de muestreo, utilizando la medida de distancia de Bray-Curtis. Se evaluaron las diferencias entre grupos de sitios en su posicionamiento respecto del PCO mediante PERMANOVA (Anderson 2017). El tiempo no fue incluido como factor en el análisis. Los muestreos realizados en distintos momentos en Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cerdón Ensayo fueron tomados como observaciones diferentes dentro de cada tratamiento. Los demás sitios fueron muestreados solo en una oportunidad.

Las diferencias entre observaciones correspondientes a diferentes momentos fueron evaluadas de manera descriptiva a partir del ordenamiento obtenido. Los supuestos de independencia de las observaciones, requeridos para estos análisis, no fueron completamente cumplidos debido a que algunos de los casos incluidos correspondieron a diferentes fechas de muestreo de un mismo sitio. Por ese motivo, así como por la falta de un adecuado diseño experimental, los resultados obtenidos se describieron en términos de tendencias. A fin de conocer las especies que contribuyeron a la diferenciación de los sitios se utilizó el método Envfit (Oksanen et al. 2013) para graficar las tendencias de variación de la cobertura de especies respecto de los ejes del PCO. Solo se graficaron aquellas que presentaron un ajuste significativo con los ejes ($P < 0.05$) o marginalmente significativo ($P < 0.1$). Todos los análisis multivariados fueron llevados a

cabo mediante el paquete Vegan (Oksanen et al. 2013) en el entorno de programación R (R core team 2020). Se calculó la proporción de nativas y exóticas en los sitios sobre cordones y canteras.

RESULTADOS

Se observaron diferencias significativas de cobertura total entre los tres tratamientos (Friedman, $Q_{g-2} = 6.3$, $P < 0.05$). En Cantera Ensayo, la cobertura vegetal fue muy escasa y se registró a partir del segundo año de muestreo. En ese tratamiento la cobertura total fue menor que en Cantera Ensayo+S y que en Cerdón Ensayo en todas las fechas, resultando en diferencias significativas (Prueba de Friedman: Cantera Ensayo < Cantera Ensayo+S, $Q_{g-1} = 4.2$, $P < 0.05$; Cantera Ensayo < Cerdón Ensayo, $Q_{g-1} = 4.4$, $P < 0.05$) (Figura 2). En Cantera Ensayo+S se alcanzaron tempranamente (diciembre de 2014) valores de cobertura total comparables con los de Cerdón Ensayo, y mantuvieron esa similitud hasta la última fecha de muestreo (marzo de 2017). La riqueza de herbáceas no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Friedman, $Q_{g-2} = 2.4$, $P > 0.35$). La riqueza de especies acumulada de todas las fechas de muestreo en los sitios Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cerdón Ensayo fue 57, 49 y 53 especies respectivamente (Material Suplementario-Tabla S1).

La composición florística difirió entre las tres situaciones (PERMANOVA: $F = 7.66$; $P = 0.001$) (Figura 3). En el PCO, el eje 1 explicó el 30.22% de la variabilidad, y el eje 2 el 18.85%. Los sitios Cantera Ensayo y Otras Canteras se separaron de Cerdón Ensayo y Otros Cordones a lo largo del eje 1, y presentaron muy baja dispersión en comparación con los cordones. Todas las fechas de muestreo de Cantera Ensayo se ubicaron cercanas entre sí y a las Otras Canteras, con pastoreo. La Cantera Ensayo+S ocupó una posición intermedia entre los grupos anteriores con una amplia variabilidad en los dos primeros ejes del ordenamiento. En los primeros muestreos, Cantera Ensayo+S presentó una composición florística similar a Cantera Ensayo y Otras Canteras. A lo largo del tiempo aumentó su similitud con los cordones no intervenidos por minería. Estos últimos exhibieron variabilidad en la composición específica reflejada por su dispersión en el eje 2, siendo los del extremo negativo de ese eje los que resultaron similares a Cantera Ensayo+S. Las especies asociadas a los grupos fueron *Cynodon dactylon* (L.) Pers. var *dactylon* con

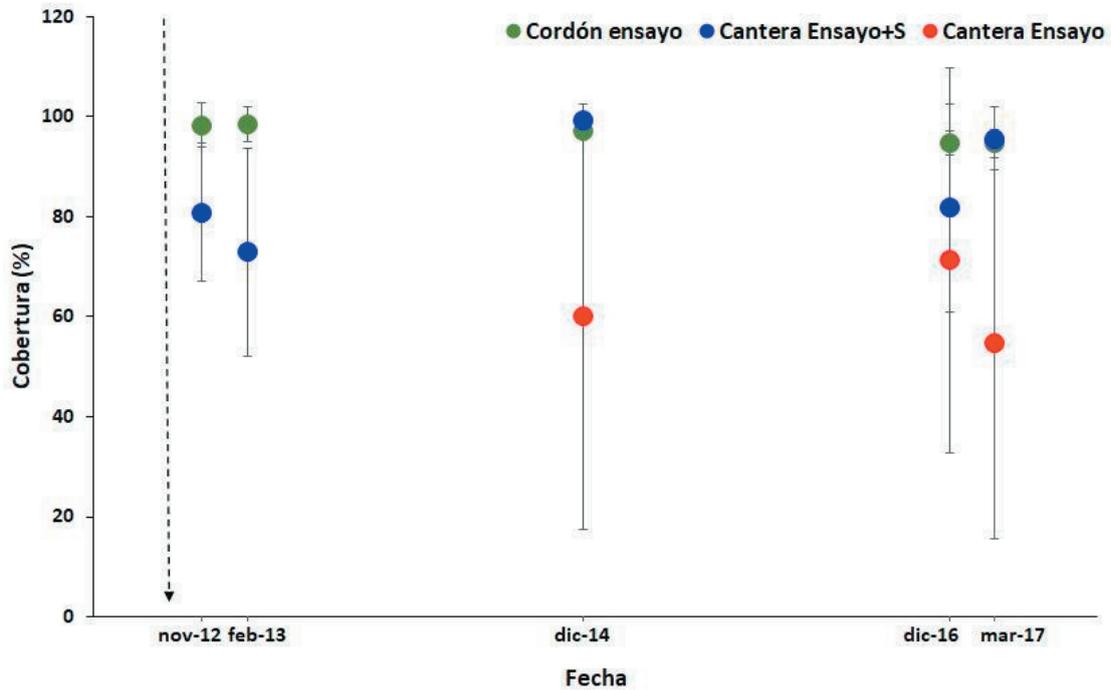


Figura 2. Cobertura de la vegetación (100-% de suelo desnudo) en las diferentes fechas de muestreo a lo largo de 5 años desde el cese de actividades en la cantera (junio de 2012), que se señala con la flecha de línea punteada. Cantera Ensayo+S: cantera reciente con agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cantera Ensayo: cantera reciente sin agregado de material superficial del suelo y sin pastoreo; Cordón Ensayo: cordón sin actividad minera adyacente a Cantera Ensayo+S y Cantera Ensayo y con pastoreo. Las líneas verticales indican la desviación estándar.

Figure 2. Vegetation cover (100-% bare soil) at the different sampling dates over 5 years after cessation of mining activity (June 2012), indicated with dotted line arrow. Cantera Ensayo+S: recent quarry with added topsoil and without grazing; Cantera Ensayo: recent quarry without added topsoil and without grazing; Cordón Ensayo: shell bank without mining activity, adjacent to Cantera Ensayo+S and Cantera Ensayo and with grazing. Vertical lines indicate standard deviations.

las canteras, y *Cynodon hirsutissimus* (Litard and Maire) Caro y E. A. Sánchez y *Cenchrus echinatus* L. con los cordones no intervenidos. No se observaron tendencias claras de diferenciación en el porcentaje de nativas entre los cordones no intervenidos por minería (Otros Cordones=72%; Cordón Ensayo=62%) y las canteras (Cantera Ensayo+S=59%; Cantera Ensayo=59%; Otras Canteras=63%).

DISCUSIÓN

Los pastizales desarrollados sobre las áreas intervenidas por minería después del cese de actividades se diferenciaron claramente de los no intervenidos por minería. El agregado de material superficial del suelo y la exclusión del pastoreo demostraron ser efectivos para lograr el establecimiento de una cobertura total y composición florística similares a los cordones no intervenidos, en aproximadamente cinco años desde la aplicación del tratamiento. La cantera con exclusión del pastoreo y sin

agregado de material superficial del suelo no se diferenció de otras canteras en su composición florística, lo que indica que la supresión del pastoreo no resultó suficiente para mejorar la situación de la vegetación en los cinco años de muestreo. Los resultados coincidieron de forma parcial con las hipótesis planteadas, ya que el agregado de suelo y la exclusión del ganado favorecieron la recuperación de la cobertura vegetal y la composición florística, pero la exclusión del ganado no resultó en mejoras apreciables sin el agregado de suelo. Debido a que los tratamientos de exclusión del ganado y agregado de material superficial del suelo se aplicaron sobre una sola cantera, no se dispuso de un diseño experimental que permita extraer conclusiones generales sobre estos efectos en las canteras de conchilla en los talares. De todos modos, los métodos aplicados sí permitieron evaluar el efecto de esos factores en el caso de estudio. Situaciones derivadas de eventos naturales o intervenciones humanas pueden representar oportunidades valiosas

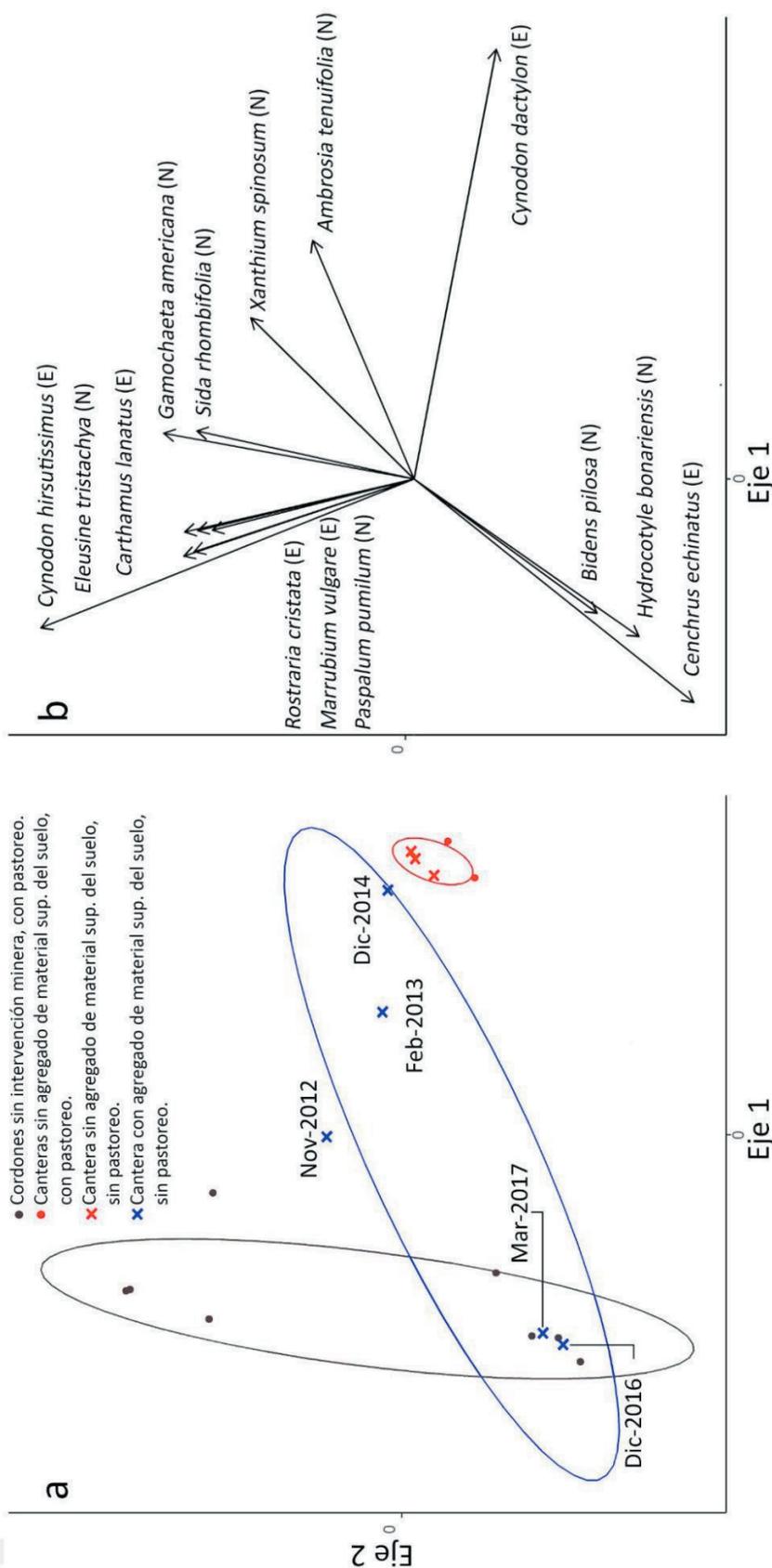


Figure 3. Principal coordinate analysis for the specific composition of the sites. (a) Cordones sin intervención minera, con pastoreo (Cordón Ensayo, Otro Cordón1, Otro Cordón2 y Otro Cordón3); Canteras sin agregado de material superficial del suelo, con pastoreo (Otra Cantera1 y Otra Cantera2); Cantera sin agregado de material superficial del suelo, sin pastoreo (Cantera Ensayo); Cantera con agregado de material superficial del suelo, sin pastoreo (Cantera Ensayo+S). Se indican las fechas de muestreo para Cantera Ensayo+S. (b) Especies que presentaron un ajuste significativo con los ejes ($P < 0.05$) o marginalmente significativo ($P < 0.1$). Se indica si son nativas (N) o exóticas (E).

Figure 3. Principal coordinate analysis for the specific composition of the sites. (a) Shell banks without mining intervention, with grazing (Cordón Ensayo, Otro Cordón1, Otro Cordón2 and Otro Cordón3); Quarries without added topsoil, with grazing (Otra Cantera1 and Otra Cantera2); Quarry without added topsoil, without grazing (Cantera Ensayo); Quarry with added topsoil, without grazing (Cantera Ensayo+S). Sampling dates for Cantera Ensayo+S are indicated. (b) Species that presented significant fit with the axes ($P < 0.05$) or marginally significant ($P < 0.1$). Native (N) or exotic (E) origin is indicated.

para evaluar tratamientos a campo, aun cuando no representen experimentos con réplicas (Davis and Gray 2015).

La minería de conchillas en los talares tiene como consecuencias la pérdida de la cobertura vegetal y una fuerte alteración del relieve y del sustrato (Arturi and Goya 2004; Carol et al. 2014; Plaza Behr et al. 2021). Frente a esta situación, los resultados obtenidos en nuestro estudio permiten señalar que la adición del material superficial del suelo —remanente del área intervenida— junto con la exclusión del pastoreo pueden contribuir a la recuperación rápida de la cobertura de la vegetación y de la composición específica, que se aproxima a la de las áreas de referencia en mayor medida que en el caso de las canteras donde no se aplicaron estas prácticas. La incorporación de suelo superficial como técnica de restauración de canteras fue destacada como una práctica exitosa para recuperar la cobertura vegetal asociada a que el suelo adicionado posee mayor fertilidad, mayor capacidad de retención del agua y mayor actividad biológica (Chenot et al. 2017, 2018; Kneller et al. 2018; Van der Bij et al. 2018).

El aporte al banco de semillas por parte del material adicionado fue evaluado como un factor importante en la recuperación de la cobertura y composición de la vegetación en algunos casos (Van der Bij et al. 2018), pero poco importante en otros (Chenot et al. 2017). Una posible causa de estas diferencias se relaciona con la procedencia del suelo adicionado. En las canteras, una práctica habitual es retirar y depositar los horizontes superficiales en acúmulos de diferente espesor en los alrededores de la explotación. La profundidad y el tiempo de almacenamiento de las semillas en esos acúmulos son factores que pueden afectar su viabilidad (Rivera et al. 2012). Aunque en el presente estudio no se hicieron evaluaciones del banco de semillas y sus posibles fuentes, la semillas almacenadas en el material adicionado podrían haber sido afectadas negativamente, ya que dicho material se mantuvo en acúmulos de 1 a 2 m de espesor durante el tiempo que duró la explotación, que fue aproximadamente dos años.

Otro aspecto importante en la restauración de canteras abandonada es la proximidad de áreas de referencia como fuente de semillas (Řehounková and Prach 2010). En nuestro estudio se evidencia que la adición de material superficial del suelo permitió una recuperación de la cobertura vegetal en un

menor tiempo que en el caso sin adición de ese material, ambas situaciones sin pastoreo (Figura 2). En Cantera Ensayo+S la adición de suelo superficial facilitaría la germinación y el establecimiento de las semillas dispersadas desde áreas cercanas, además del potencial aporte al banco de semillas. En cambio, en Cantera Ensayo (sin adición de suelo) se puede observar, a cinco años de iniciado el proceso de recuperación, que existen áreas sin cobertura vegetal o donde esta es muy escasa, asociada a una mayor proporción de conchilla en superficie.

Por sobre las diferencias en el muestreo, la composición florística fue similar entre las canteras sin agregado de suelo y se diferenciaron de los cordones no intervenidos por minería. La cantera con agregado de material superficial del suelo describe una 'trayectoria' que la ubica tempranamente junto a las canteras sin agregado de suelo, mientras que con el correr del tiempo aumenta su similitud con los cordones sin intervención minera (Figura 3). Estos resultados evidencian que la restauración mediante la adición de un sustrato con mayor contenido de materia orgánica y posiblemente banco de semillas, junto con la exclusión del pastoreo, permiten una recuperación relativamente rápida de la cobertura y composición de estos pastizales.

Se observó una asociación entre las especies de plantas y las situaciones estudiadas (Figura 3), pero no se apreciaron tendencias claras de esas especies a diferenciarse según los grupos funcionales establecidos para la zona por Arturi et al. (2010). Se puede resaltar que las gramíneas perennes nativas de ciclo estival fueron observadas sobre todo en los cordones no afectados por la minería, y son reconocidas como típicas de pastizales sin disturbios (Chaneton et al. 2002; Arturi et al. 2010).

La riqueza de especies registrada en Cantera Ensayo+S, Cantera Ensayo y Cerdón Ensayo es similar a la señalada por Arturi et al. (2010), quienes reportaron 57 especies en pastizales de los talares ubicados entre las localidades de Magdalena y Punta Indio. La importancia de especies exóticas fue notoria en todos los sitios intervenidos por minería, a pesar de que la antigüedad desde el cese de las intervenciones en diferentes canteras varió entre 1 y 3 años. Es esperable una asociación positiva entre la importancia de las especies exóticas en la composición de los pastizales y la intensidad del disturbio. En los pastizales de la Pampa Inundable la herbivoría por

ganado doméstico es una de las principales causas del incremento de especies exóticas (Chaneton et al. 2002; Perelman et al. 2007). El incremento de exóticas estaría vinculado con el carácter generalista de estas especies que pueden aprovechar los recursos liberados por la presión de pastoreo del ganado doméstico sobre la cobertura de las gramíneas perennes de ciclo estival (Perelman et al. 2007). En el caso de las canteras abandonadas, a la remoción de la cubierta vegetal y los profundos cambios en el suelo se sumaría el efecto del pastoreo, favoreciendo el establecimiento de las especies exóticas. La especie exótica *C. dactylon*, cuyo incremento en importancia fue relacionado con el pastoreo del ganado en pastizales de la Pampa Inundable, vinculado con su capacidad de reproducción vegetativa y dispersión por endozoocoria (Deregibus et al. 1986; Vignolo and Fernández 2010), estuvo significativamente asociada a las canteras sin adición de material superficial del suelo. Debido a que el diseño de muestreo de este trabajo no permite discriminar el efecto del pastoreo y de la actividad minera, se requiere de futuros estudios para cuantificar la contribución independiente de cada uno de esos factores sobre la composición de la vegetación.

En los talaes, la vegetación que se desarrolla sobre cordones de conchilla con baja cobertura del estrato arbóreo representa

áreas valiosas de pastizal por su riqueza en especies nativas, muchas de ellas con alto valor forrajero (Vervoorst 1967; Bilenca and Miñarro 2004; Arturi et al. 2006). De acuerdo con los resultados de nuestro estudio, estos pastizales presentan una proporción elevada de especies nativas, del 60 al 70%, aun bajo pastoreo. Estos podrían representar una fuente de semillas para el repoblamiento de especies nativas en áreas degradadas, pero su creciente reducción y fragmentación podrían constituir una limitante en ese sentido. Las canteras abandonadas, con una adecuada distribución del material remanente y con exclusión del ganado pueden recuperar la cobertura herbácea y su composición florística en pocos años, lo cual favorecería la permanencia en el paisaje de una mayor proporción de especies propias de los pastizales pampeanos y la colonización de las áreas no tratadas. De este modo, se podrían diseñar técnicas de restauración que resulten ecológica y económicamente viables.

AGRADECIMIENTOS. Este trabajo fue financiado por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP) y por la empresa Don Domingo S.A. Agradecemos a María Rosa Derguy, Maia Plaza Behr y Luz Torres por su colaboración en el trabajo de campo; y al Dr. Pedro Tognetti y a tres revisoras/es anónimas/es por sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Anderson, M. J. 2017. Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA). Wiley StatsRef: Statistics Reference Online 12:1-15. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07841d>.
- Arturi, M. F., and J. F. Goya. 2004. Estructura, dinámica y manejo de los talaes del NE de Buenos Aires. Pp. 1-23 en M. F. Arturi, J. L. Frangi and J. F. Goya (eds.). Ecología y manejo de los bosques de Argentina. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15915>.
- Arturi, M. F., C. Pérez, M. Horlent, J. F. Goya, and S. S. Torres Robles. 2006. El manejo de los talaes de Magdalena y Punta Indio como estrategia para su conservación. Pp. 37-45 en E. Mérida and J. Athor (eds.) Talaes bonaerenses y su conservación. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Buenos Aires.
- Arturi, M. F., C. Pérez, and S. S. Torres Robles. 2010. Plant traits and canopy types: seasonal and local variation in a grazed semi-deciduous temperate woodland. *Phytocoenologia* 40:245-253. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2010/0040-0438>.
- Barral, M. P., J. M. Rey Benayas, P. Meli, and N. O. Maceira. 2015. Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 202:223-231. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.009>.
- Bilenca, D., and F. Miñarro. 2004. Identificación de Áreas Valiosas de Pastizal (AVPs) en las Pampas y Campos de Argentina, Uruguay y Sur de Brasil. Fundación Vida Silvestre, Buenos Aires, Argentina.
- Burgos, J. J. 1968. El clima de la Provincia de Buenos Aires. Pp. 33-101 en A. L. Cabrera (ed.). Flora de la Provincia de Buenos Aires. Colección Científica del INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Burkart, S. E., R. J. León, M. C. Conde, and S. B. Perelman. 2011. Plant species diversity in remnant grasslands on arable soils in the cropping Pampa. *Plant Ecology* 212:1009-1024. <https://doi.org/10.1007/s11258-010-9881-z>.
- Cabrera, A. L. 1949. Las comunidades vegetales de los alrededores de La Plata (Provincia de Buenos Aires, República Argentina). *Lilloa* 20:269-376.
- Carol, E. S., F. Braga, E. E. Kruse, and L. Tosi. 2014. A retrospective assessment of the hydrological conditions of the Samborombón coastland (Argentina). *Ecological Engineering* 67:223-237. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.081>.

- Chaneton, E. J., S. B. Perelman, M. Omacini, and R. J. León. 2002. Grazing, environmental heterogeneity, and alien plant invasions in temperate Pampa grasslands. *Biological Invasions* 4:7-24. <https://doi.org/10.1023/A:1020536728448>.
- Chenot, J., R. Jaunatre, E. Buisson, and T. Dutoit. 2017. Long-term effects of topsoil transfer assessed thirty years after rehabilitation of dry alluvial quarries in Southeastern France. *Ecological Engineering* 99:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.010>.
- Chenot, J., R. Jaunatre, E. Buisson, F. Bureau, and T. Dutoit. 2018. Impact of quarry exploitation and disuse on pedogenesis. *Catena* 160:354-365. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.012>.
- Davies, G. M., and A. Gray. 2015. Don't let spurious accusations of pseudoreplication limit our ability to learn from natural experiments (and other messy kinds of ecological monitoring). *Ecology and Evolution* 5:5295-5304. <https://doi.org/10.1002/ece3.1782>.
- Deregibus, V. A., J. J. Casal, and F. Simone. 1986. Efectos del pastoreo con altas cargas en pasturas invadidas por la gramilla (*Cynodon dactylon*). *Revista Argentina de Producción Animal* 6:689-694.
- Giménez, J. E., M. A. Hurtado, and O. R. Martínez. 2008. Characterization of abiotic conditions affecting vegetation distribution in the river Plate coastal plain, Argentina. *Acta Scientiarum. Biological Sciences* 30:423-430. <https://doi.org/10.4025/actasciobiols.v30i4.5875>.
- Jones, H. P., and O. J. Schmitz. 2009. Rapid recovery of damaged ecosystems. *PLoS ONE* 4(5):e5653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005653>.
- Kneller, T., R. J. Harris, A. Bateman, and M. Muñoz-Rojas. 2018. Native-plant amendments and topsoil addition enhance soil function in post-mining arid grasslands. *Science of the Total Environment* 621:744-752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.219>.
- Loydi, A. 2019. Effects of grazing exclusion on vegetation and seed bank composition in a mesic mountain grassland in Argentina. *Plant Ecology and Diversity* 12(2):127-138. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1593544>.
- Matteucci, S. D., and A. Colma. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación (Vol. 22). Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, DC, USA.
- Modernel, P., W. A. Rossing, M. Corbeels, S. Dogliotti, V. Picasso, and P. Tittonell. 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters* 11(11):113002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113002>.
- Oksanen, J., F. G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P. R. Minchin, R. B. O'Hara, G. L. Simpson, P. Solymos, M. H. H. Stevens, E. Szoecs, and M. J. Oksanen. 2013. Package 'vegan'. *Community ecology package* 2(9):1-295. URL: cran.r-project.org.
- Perelman, S. B., W. B. Batista, E. Chaneton, and R. J. C. León. 2007. Habitat stress, species pool size, and biotic resistance influence exotic plant richness in the Flooding Pampa grasslands. *Journal of Ecology* 95:662-673. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01255.x>.
- Plaza Behr, M., C. Pérez, J. Goya, and M. Arturi. 2021. Supervivencia y crecimiento de *Celtis tala* Gillies ex Planch en la rehabilitación ecológica de canteras de conchilla abandonadas. *Ecología Austral* 31:251-260. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1340>.
- Prach, K., L. Šebelíková, K. Řehouňková, and R. del Moral. 2020. Possibilities and limitations of passive restoration of heavily disturbed sites. *Landscape Research* 45:247-253. <https://doi.org/10.1080/01426397.2019.1593335>.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: R-project.org.
- Řehouňková, K., and K. Prach. 2010. Life-history traits and habitat preferences of colonizing plant species in long-term spontaneous succession in abandoned gravel-sand pits. *Basic and Applied Ecology* 11:45-53. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.06.007>.
- Rivera, D., B. M. Jáuregui, and B. Peco. 2012. The fate of herbaceous seeds during topsoil stockpiling: Restoration potential of seed banks. *Ecological Engineering* 44:94-101. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.03.005>.
- Rodríguez, A. M., and E. J. Jacobo. 2013. Glyphosate effects on seed bank and vegetation composition of temperate grasslands. *Applied Vegetation Science* 16(1):51-62. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2012.01213.x>.
- Sánchez, R. O., J. A. Ferrer, O. A. Duymovich, and M. A. Hurtado. 1976. Estudio pedológico integral de los Partidos de Magdalena y Brandsen (Provincia de Buenos Aires). *Anales del LEMIT Serie II N° 310, 1*, Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Society of Ecological Restoration International Science and Policy Working Group. 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International, Tucson, AZ, USA.
- Torres Robles, S. S. 2009. Variación geográfica de la composición y riqueza de plantas vasculares en los talares bonaerenses y su relación con el clima, sustrato, estructura del paisaje y uso. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina. <https://doi.org/10.35537/10915/55171>.
- Torres Robles, S. S., and M. F. Arturi. 2009. Variación de la composición y riqueza florística en los talares del Parque Costero del Sur y su relación con el resto de los talares bonaerenses. Pp. 104-121 *en* J. Athor (ed.). *Parque Costero del Sur*. Naturaleza, Conservación y Patrimonio Cultural. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Buenos Aires, Argentina.
- Van der Bij, A. U., M. J. Weijters, R. Bobbink, J. A. Harris, M. Pawlett, K. Ritz, P. Benetková, J. Moradie, J. Frouz, and R. van Diggelen. 2018. Facilitating ecosystem assembly: plant-soil interactions as a restoration tool. *Biological Conservation* 220:272-279. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.010>.
- Vervoorst, F. B. 1967. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado. *La Vegetación de la República Argentina*,

- Serie Fitogeográfica N° 7. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Vignolio, O. R., and O. N. Fernández. 2010. Cattle dung as vector of spreading seeds of exotic species in the Flooding Pampa grasslands (Buenos Aires, Argentina). *Annales Botanici Fennici* 47:14-22. <https://doi.org/10.5735/085.047.0102>.
- Zuloaga, F. O., and O. Morrone (eds.). 1996. Catálogo de las plantas vasculares de la República Argentina. I. Pteridophyta, Gymnospermae and Angiospermae (Monocotyledoneae). *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 60:1-323.
- Zuloaga, F. O., and O. Morrone (eds.). 1999. Catálogo de las plantas vasculares de la República Argentina. II. Angiospermae (Dicotyledoneae). *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 64:1-1269.
- Zuloaga, F. O., E. G. Nicora, Z. E. Rúgolo de Agrasar, O. Morrone, J. F. Pensiero, and A. M. Cialdella. 1994. Catálogo de la familia Poaceae en la República Argentina. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 47:1-178.