

# Regeneración y dinámica funcional de pastizales nativos intervenidos por ductos de hidrocarburos en la estepa de Magallanes

ERWIN DOMÍNGUEZ<sup>1</sup>, MILENKA SEGUICH<sup>2</sup>, SEBASTIÁN PÉREZ<sup>3</sup>, GERARDO MORENO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> [HTTPS://ORCID.ORG/0000-0002-1907-8399](https://ORCID.ORG/0000-0002-1907-8399)

<sup>2</sup> [HTTPS://ORCID.ORG/0009-0004-8696-8617](https://ORCID.ORG/0009-0004-8696-8617)

<sup>3</sup> [HTTPS://ORCID.ORG/0009-0009-1435-0961](https://ORCID.ORG/0009-0009-1435-0961)

<sup>4</sup> [HTTPS://ORCID.ORG/0000-0001-8053-2696](https://ORCID.ORG/0000-0001-8053-2696)

## OPEN ACCESS

## RESUMEN

**Recibido:**

05/09/2025

**Revisado:**

23/12/2025

**Aceptado:**

26/12/2025

**Publicado en línea:**

31/12/2025

**Editor Jefe**

Dr. Americo Montiel San Martin

**Editor a cargo:**MSc. Marcela Valenzuela  
Saavedra, Centro Internacio-  
nal Cabo de Hornos (CHIC)

ISSN 0718-686X

Los ductos subterráneos de hidrocarburos representan una fuente creciente de perturbación en ecosistemas áridos y fríos del sur de Sudamérica, pero sus efectos ecológicos de largo plazo siguen siendo poco conocidos. En este estudio se evaluaron los impactos de la construcción de ductos sobre la vegetación y el suelo en pastizales de *Festuca gracillima* (coironal) de la estepa Magallánica, Chile. Se analizaron 14 ductos de distinta antigüedad (3–14 años) mediante el muestreo de 442 parcelas de vegetación (221 en la línea de flujo y 221 en áreas de referencia), complementado con análisis físico-químicos de suelos (0–15 cm).

La vegetación mostró alteraciones significativas. La riqueza de especies disminuyó en la línea de flujo ( $19,6 \pm 9,9$  vs.  $31,0 \pm 9,6$  especies), así como la cobertura vegetal ( $36,2 \pm 19,6\%$  vs.  $74,0 \pm 6,0\%$ ), mientras que el suelo desnudo aumentó de manera marcada. La diversidad de Shannon fue ligeramente mayor en los sitios intervenidos ( $H' = 2,06 \pm 0,37$  vs.  $1,75 \pm 0,45$ ), reflejando la proliferación de especies ruderales e introducidas. El análisis SIMPER mostró que la disminución de dominantes nativas como *Festuca gracillima* y *Empetrum rubrum*, junto con la expansión de *Poa pratensis*, *Rumex acetosella* y *Taraxacum officinale*, explicaron más del 50% de la disimilitud florística. En contraste, la especie invasora *Hieracium pilosella* fue más abundante en las áreas de referencia, lo que sugiere una asociación con regímenes de perturbación intermedia.

Las respuestas del suelo fueron más sutiles, aunque no despreciables. Las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, capacidad de retención de agua)



## Contribuciones de los autores

**E.D:** realizó muestreo, identificación de especies, elaboración datos, redacción general del manuscrito, análisis de la información, confección de tablas y figuras, análisis estadístico, discusión.

**M.S y S.P:** tabularon los datos y realizaron los análisis estadísticos y revisaron el manuscrito.

**G.M:** realizó el análisis de las muestras de suelo. Todos los autores contribuyeron a la revisión del manuscrito, lo leyeron y aprobaron la versión final enviada.

## Financiamiento

Este trabajo fue realizado con el apoyo del proyecto: "Monitoreo de la cubierta vegetal en instalaciones de ENAP Magallanes" No MA31102627

## Conflictos de intereses

Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.

no mostraron diferencias consistentes entre tratamientos. Sin embargo, varias propiedades químicas se alteraron significativamente en los suelos perturbados, incluyendo aumentos de nitrógeno total, fósforo disponible, manganeso, calcio, magnesio y nitrato, junto con una disminución del aluminio intercambiable y del contenido de arcilla, aunque los cambios fueron mayoritariamente transitorios. El Análisis de Correspondencia Canónica reveló una segregación florística clara asociada a gradientes de suelo desnudo, arena, materia orgánica y pH, lo que indica que, aunque los cambios edáficos sean moderados, influyen en las trayectorias sucesionales.

En conjunto, los resultados demuestran que los ductos subterráneos generan cambios prolongados en la estructura y composición de la vegetación, aun cuando las alteraciones del suelo sean modestas o transitorias. La regeneración natural progresó lentamente y conduce a comunidades simplificadas dominadas por especies oportunistas de bajo valor funcional. Estos hallazgos resaltan la necesidad de evaluar críticamente las estrategias de restauración basadas en siembras agronómicas y de considerar la regeneración natural asistida como una alternativa más sostenible para conservar la biodiversidad, la funcionalidad ecológica y los reservorios de carbono en pastizales áridos.

**Palabras clave:** Análisis de correspondencia canónica, ductos de hidrocarburos, estepa Magallánica, *Festuca gracillima*, regeneración natural, restauración ecológica, sucesión secundaria, suelo desnudo

# Regeneration and Functional Dynamics of Native Grasslands Disturbed by Hydrocarbon Pipelines in the Magallanes Steppe

## ABSTRACT

Underground hydrocarbon pipelines represent a growing source of disturbance in arid and cold ecosystems of southern South America, yet their long-term ecological impacts remain poorly understood. We evaluated the effects of pipeline construction on vegetation and soil in *Festuca gracillima* (coironal) grasslands of the Magellanic steppe, Chile. Fourteen pipelines of varying ages (3–14 years) were surveyed using 442 vegetation plots (221 along the pipeline corridor, 221 in reference areas), combined with soil sampling (0–15 cm) for physical and chemical analyses.

Vegetation was strongly affected. Species richness declined significantly in the pipeline corridor ( $19.6 \pm 9.9$  vs.  $31.0 \pm 9.6$  species), as did total cover ( $36.2 \pm 19.6\%$  vs.  $74.0 \pm 6.0\%$ ), while bare soil increased markedly. Shannon diversity was slightly

higher in disturbed sites ( $H' = 2.06 \pm 0.37$  vs.  $1.75 \pm 0.45$ ), reflecting the proliferation of ruderal and introduced species. SIMPER analysis showed that the decline of native dominants such as *Festuca gracillima* and *Empetrum rubrum*, together with the expansion of *Poa pratensis*, *Rumex acetosella*, and *Taraxacum officinale*, explained more than 50% of community dissimilarity. The invasive *Hieracium pilosella* was unexpectedly more abundant in reference areas, suggesting a preference for intermediate disturbance regimes.

Soil responses were more subtle but not negligible. Most physical properties (bulk density, porosity, water holding capacity) showed no consistent differences between treatments. However, several chemical parameters were significantly altered in disturbed soils, including increases in total nitrogen, available phosphorus, manganese, calcium, magnesium, and nitrate, and a decrease in exchangeable aluminum and clay content, although most changes faded out at short term. Canonical Correspondence Analysis revealed clear floristic segregation along gradients of bare soil, sand content, organic matter, and pH, indicating that soil properties, although moderately affected, shape successional trajectories.

Overall, our results demonstrate that underground pipelines cause long-lasting changes in vegetation structure and composition, even when soil alterations appear modest or transient. Natural regeneration progresses slowly, leading to simplified communities dominated by opportunistic species with protective but low functional value. These findings highlight the need to critically evaluate restoration strategies based on agronomic sowing, and to consider assisted natural regeneration as a more sustainable option for conserving biodiversity, ecosystem function, and soil carbon stocks in arid grasslands.

**Keywords:** Bare soil, canonical correspondence analysis, ecological restoration, *Festuca gracillima*, hydrocarbon pipelines, Magellanic steppe, secondary succession

## INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas de estepa de la región de Magallanes y de la Antártica Chilena, existen aproximadamente 9500 kilómetros de tuberías de oleoductos construidos principalmente por ENAP-Magallanes y otras empresas de hidrocarburos. Se espera que esta cifra aumente en el futuro debido a la construcción de acueductos, amonio ductos y redes de alta tensión requeridas por la industria del hidrógeno verde. Para los ductos soterrados en Chile la normativa ambiental exige la recuperación de un 60% de la cobertura vegetal declarada al inicio del proyecto, la cual debe ser obtenida al segundo año de la instalación del ducto; si esto no ocurre, el titular del proyecto debe realizar una intervención agronómica a través del establecimiento una siembra, utilizando especies agronómicas (no nativas), fertilizantes sintéticos y maquinaria pesada. Estas prácticas han sido consideradas como un doble impacto para el suelo y la vegetación, y un freno adicional para la restauración de las comunidades vegetales nativas (Avirmed *et al.* 2014, Domínguez 2023).

Los ductos de hidrocarburos subterráneos representan un método seguro y efectivo para el transporte de petróleo y gas natural (Brehm & Culman, 2022). No obstante, su instalación implica un movimiento significativo de suelo que inevitablemente genera perturbaciones en sus características físicas y biológicas (Tekeste *et al.* 2020), así como en la cubierta vegetal, alterando su composición y estructura (Naeth *et al.* 2020; Brehm & Culman, 2022). En el hemisferio norte, los umbrales de éxito en la recuperación de la cubierta vegetal varían ampliamente, desde mínimos

cercanos a 10 años hasta alteraciones persistentes por más de 60 años, dependiendo de la complejidad de la comunidad vegetal y de las condiciones ambientales (Harper & Kershaw, 1997; Kowaljow & Rostagno, 2013; Zhao *et al.* 2022). En climas áridos y fríos, la regeneración del suelo y la vegetación suele ser aún más lenta debido a las limitaciones físicas para la actividad biológica (Call *et al.* 1991; Liu *et al.* 2010; Walck *et al.* 2011; del Mar González *et al.* 2024). Sin embargo, existe escasa información para el hemisferio sur, en particular para los ecosistemas australes de estepa fría, donde la aridez y las bajas temperaturas imponen restricciones adicionales a los procesos de regeneración.

Por otra parte, algunos estudios recientes indican que la regeneración natural puede ser una estrategia eficaz para la recuperación de la biodiversidad, los procesos ecológicos y los servicios ecosistémicos en distintos ecosistemas, incluidos los pastizales (Elsinger *et al.* 2022; Soulodre *et al.* 2022). Esta mayor efectividad se explica, en parte, por el favorecimiento del establecimiento de propágulos nativos, los cuales presentan una mejor adaptación a las condiciones ambientales locales en comparación con propágulos introducidos (Prach *et al.* 2019; Soulodre *et al.* 2022), lo que ha sido documentado en pastizales de la Estepa Magallánica perturbados por ductos (Domínguez 2023).

Los ductos soterrados seguirán construyéndose debido a la necesidad de conectar la matriz energética (Elsinger *et al.* 2023; Brehm & Culman, 2022). En este contexto, es prioritario conocer el efecto de la construcción de ductos de hidrocarburos produce sobre la dinámica de la regeneración de los pastizales nativos, y también el impacto sobre sus suelos, en la medida de que estos constituyen importantes reservorios de carbono (Pfeiffer *et al.* 2020; Pérez-Quezada *et al.* 2023). Estudios previos en pastizales de *Festuca gracillima* en Patagonia Argentina han demostrado que la recolonización natural puede ser significativa tras disturbios severos como la roturación y siembra de especies forrajeras, especialmente en suelos no salinos y con buen contenido de calcio (Ferrante *et al.* 2023). Este conocimiento es crucial, ya que la sucesión vegetal ha sido escasamente estudiada en la estepa Magallánica, y se sabe relativamente poco sobre los mecanismos implicados en el repoblamiento y los cambios en la biodiversidad. Solo dos estudios de caso han evaluado el grado de recuperación de la vegetación de pastizales nativos asociada a los ductos en la Patagonia chilena, ambos estudios concluyeron que se pudo lograr una riqueza y cobertura florística en la línea de flujo similar a la vegetación de referencia después de 7 y 8 años de transcurrida la intervención (Domínguez *et al.* 2022; Domínguez, 2023). Pero, aún se desconoce las condiciones que determinan/favorecen la efectividad y velocidad de la regeneración.

Este estudio, busca responder las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los cambios en la composición, estructura y biodiversidad de la vegetación en pastizales nativos intervenidos por la instalación de ductos subterráneos? ¿Qué rasgos funcionales caracterizan a las especies de plantas predominantes en el proceso de sucesión secundaria en pastizales nativos de coirón intervenidos por los ductos? ¿Cómo las variables ambientales relacionadas al suelo afectan la cubierta vegetal en áreas intervenidas por ductos en comparación con áreas no perturbadas?

Los objetivos específicos de este estudio son: 1) Caracterizar los cambios en la composición, estructura y biodiversidad de la vegetación intervenida por los ductos subterráneos, 2) Evaluar los rasgos funcionales de los tipos de hábito de las especies de plantas predominantes en el estado de sucesión secundaria, y 3) Comprender mejor los factores ambientales que influyen en la biodiversidad. De este modo, se espera cuantificar la respuesta de los pastizales nativos a los cambios generados por las instalaciones de ductos sobre las plantas y las propiedades del suelo.

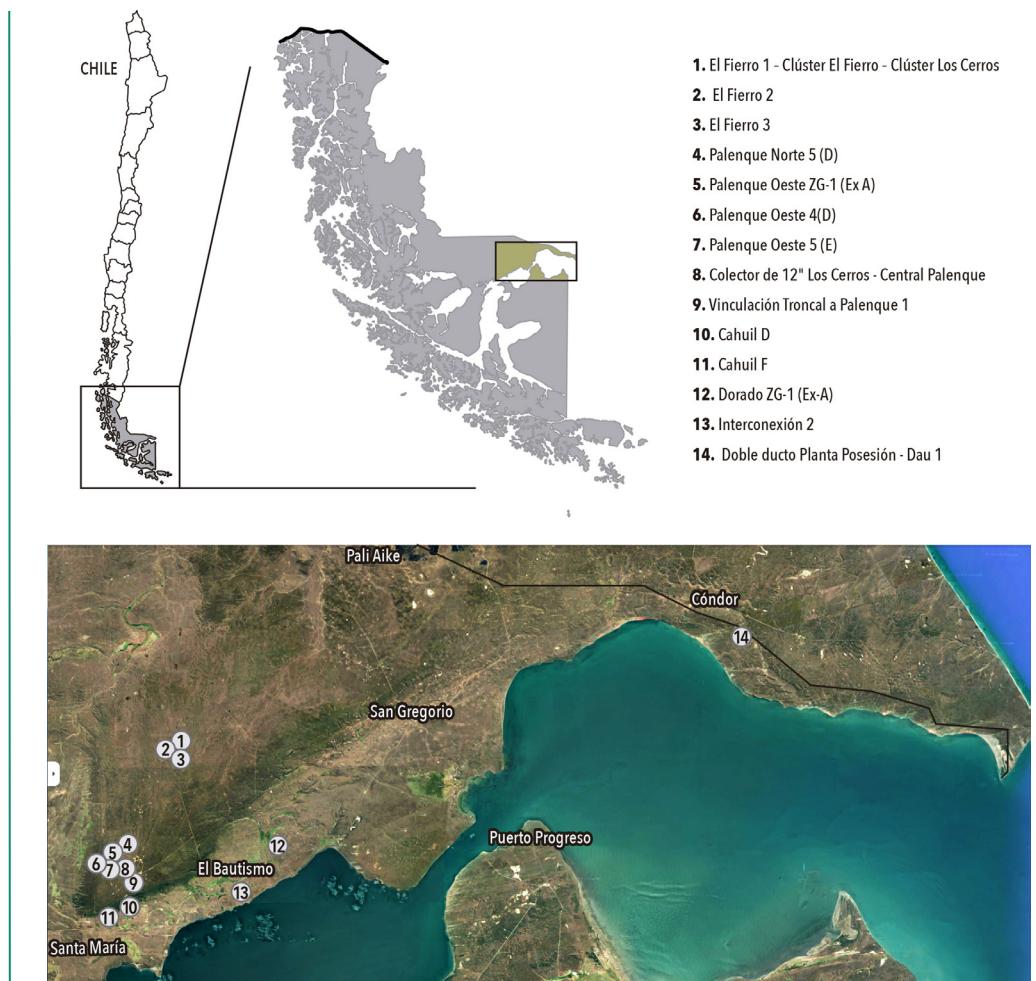
## MATERIAL Y MÉTODOS

### Área de estudio

Este estudio se realizó en el ecosistema de la estepa Patagónica de Magallanes la cual cubre una superficie estimada de 24.434 km<sup>2</sup> (18,5% de la superficie de Magallanes continental) en la comuna de San Gregorio (48°36'–56°30' S y 66°25'–75°40' O). El área de estudio está ubicada en un régimen climático continental semiárido, en el cual, la precipitación es menor que la evapotranspiración durante la mayor parte del año (Pisano, 1977). Además, se caracteriza por ser la más afectada por la erosión del suelo según CIREN (2010). Sobre estos pastizales se desarrolla la ganadería ovina, con un pastoreo continuo o rotaciones estacionales con bajas densidades y actividades mineras vinculadas a la extracción de hidrocarburos (Fig. 1). El área de estudio se ubica en zona de estepa templada oriental de *Festuca gracillima* y *Empetrum rubrum* (piso de vegetación N°125), según la clasificación de Luebert & Pliscoff (2017). De acuerdo con Santibáñez *et al.* 2017, en el Atlas Agroclimático de Chile, se clasifica este sector en el Distrito 12-5, Villa Tehuelches, dentro del tipo Estepa fría de humedad semiárido (BSkSa), el cual no tiene condiciones agronómicas apropiadas para el desarrollo de cultivos. Collantes & Faggi (1999) describen un déficit hídrico en la estepa patagónica de septiembre a abril debido a fuertes vientos del oeste. En cuanto al relieve, el área de estudio se puede clasificar en dos tipos: una meseta con alturas que pueden superar los 250 msnm, y tierras próximas al nivel del mar 0 msnm. Los suelos de los pastizales son de origen glaciar y fluvio-glaciar (Pisano, 1977). La mineralización de estos suelos es muy lenta, lo que implica altos contenidos de carbono, pero una severa deficiencia de nitrógeno, fósforo y azufre, el pH tiende a ser entre ligeramente ácidos a alcalinos en la mayoría de los suelos de la estepa, con valores que varían desde 5,7 hasta 7,7 (Radic-Schilling *et al.* 2021).

### Características técnicas de la construcción del ducto

La técnica empleada para la construcción del ducto se denomina elevación doble (Neilsen *et al.* 1990). Esta consiste en abrir una trinchera de 1,5 m de ancho, toda la vegetación y el suelo orgánico es acopiado a la izquierda de la zanja, y a la derecha se deposita el suelo mineral. Luego la tubería es enterrada a una profundidad de 1,5 m en promedio, retornando el suelo mineral primero y encima el suelo orgánico, simulando las condiciones originales. Luego el ducto es abandonado y monitoreado cada año. Si al segundo año, no recupera el 60% de la cobertura vegetal exigida por la autoridad ambiental local, se procede a ejecutar el Plan de Intervención de la Cubierta Vegetal (PICV) (Servicio de Evaluación Ambiental. (2021). Guía para la descripción de proyectos de desarrollo minero de petróleo y gas en el SEIA (2a ed.). Cabeza S.A. <https://www.sea.gob.cl/guia-proyectos-petroleo-gas>), el cual consiste en términos generales en fertilizar el suelo con la mezcla NPK y sembrar una mezcla de semilla comerciales de especies forrajeras introducidas con valor agronómico tales como: *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium repens* y *Poa* sp.



### Diseño de muestreo

Entre noviembre de 2021 y febrero de 2022, se evaluaron un total de 14 ductos en pastizales nativo de *Festuca gracillima* (coirón), los que tiene por objetivo transportar la producción de hidrocarburos (gas), para abastecer la matriz energética regional y nacional. La longitud de ductos analizados fueron 30.212 m y la edad de la tubería soterrada fue de, 3 años (2 ductos), 4 años (1 ducto), 7 años (2 ductos), 8 años (3 ductos), 9 años (1 ducto), 10 años (1 ducto), 11 años (1 ducto), 12 años (3 ductos). La caracterización de la cubierta vegetal se realizó estableciendo 442 parcelas en total (15-16 por ducto, distanciadas entre ellas cada 30-100 m, dependiendo del largo del ducto), tipo Parker modificado de acuerdo a Domínguez (2023), de un tamaño de 1 m<sup>2</sup> (2 x 0,5 m). 221 parcelas fueron ubicadas al azar a una distancia de entre 40 y 45 metros a lo largo del eje del ducto, mientras que otras 221 parcelas se ubicaron al azar perpendicularmente a una distancia de entre 20 y 25 metros desde la parcela instalada en la línea de flujo del ducto. Se registró la elevación y la posición geográfica de cada sitio se registró mediante GPS Map 64x Garmin.

## Composición florística

La determinación taxonómica de los taxones se realizó mediante claves y descripciones botánicas disponibles en la literatura, tomando en consideración la Flora Patagónica de INTA (Correa, 1969, 1971, 1978, 1984, 1985, 1988, 1999). La nomenclatura de las especies se basó en el Catálogo de Plantas Vasculares de Chile (Rodríguez & Marticorena, 2019). El origen geográfico se basa en la Flora Vascular del Cono Sur (<http://www.darwin.edu.ar/>) (Zuloaga *et al.* 2020). En los casos donde no fue posible asignar un nombre específico, los taxones se nombran a nivel de género (p.ej. *Festuca* spp.). Las especies introducidas fueron clasificadas como invasoras y de importancia agronómica (Domínguez & Santis, 2021). Las categorías de amenaza asignadas fueron evaluadas según su estado de conservación de acuerdo con el Reglamento de Clasificación de Especies del Ministerio del Medio Ambiente de Chile (<https://clasificacionespecies.mma.gob.cl/>). También fueron clasificados los taxones de acuerdo al hábito de crecimiento: graminoides, hierbas, arbustos enanos (postrados o en cojín), subarbustos, arbustos, briófitas y líquenes (Bruun *et al.* 2006).

## Análisis de suelo

De cada ducto evaluado se tomaron 4 muestras, 1 utilizada para la determinación de la densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) y las otras 3 muestras (agrupadas en una única muestra compuesta) para un análisis químico y de textura. La profundidad de muestreo fue de 0 a 15 cm, tanto para la densidad aparente, como para la textura y las muestras de análisis químico. Cada muestra se recolectó utilizando núcleos metálicos estandarizados (7 cm de diámetro, 5,5 cm de altura, 211,62  $\text{cm}^3$  de volumen), tomando una porción de la capa superficial del suelo entre 5 a 10 cm, asumiendo como una zona representativa de los 0-15 cm. Las muestras de densidad aparente fueron tomadas de debidamente separadas y etiquetadas, mientras que las otras muestras de cada sitio, para el análisis textural y químico, se mezclaron para obtener una muestra compuesta. La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, para lo cual las muestras individuales se secaron en estufa durante 48 h a 105°C. La porosidad del suelo se determinó utilizando el supuesto de densidad real del suelo correspondiente entre 0,6 a 1  $\text{g cm}^{-3}$  (Ordóñez *et al.* 2023). Las muestras se analizaron en el laboratorio de suelos del INIA Quilamapu. Se determinaron los siguientes parámetros: pH en  $\text{H}_2\text{O}$ , pH en  $\text{CaCl}_2$ , % Materia Orgánica, capacidad de intercambio iónico (CICE en  $\text{mmol/g}$ ), N disponible ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ , en  $\text{mg/kg}$ ), P intercambiable ( $\text{PO}_4^{3-}$ , en  $\text{mg/kg}$ ), cuatro cationes básicos principales ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , todos en  $\text{cmol/kg}$ ; y  $\text{K}^+$ , en  $\text{mg/kg}$ ), Al intercambiable (en  $\text{cmol/kg}$ ), S ( $\text{SO}_4^{2-}$ , en  $\text{mg/kg}$ ), B (en  $\text{mg/kg}$ ) y micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe, todos en  $\text{mg/kg}$ ). Los datos ambientales están en Tabla 2.

A partir de los resultados de materia orgánica y densidad aparente del suelo, se calculó el stock de carbono orgánico en los primeros 15 cm de profundidad del suelo, a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Stock C (Mg/ha)} = 10000 \text{ m}^2 \text{ha} * 0.15 \text{ m} * \text{Dap (Mg m}^{-3}\text{)} * \text{M.O.} / 1,724 / 100$$

Dap = Densidad aparente expresada como  $\text{Mg/m}^3$  (idéntico valor a  $\text{g cm}^{-3}$ )

M.O. = contenido en materia orgánica, expresada en porcentaje de peso.

1,724 = relación entre la materia orgánica y el carbono orgánico (1 g C = 1,724 g M.O., de acuerdo a van Bemmelen, 1890).

100 = transformación de porcentaje (g C en 100 g suelo) a ratio (g C en 1 g suelo).

## Análisis estadístico

Para analizar los efectos de la construcción de los ductos sobre las propiedades del suelo, se seleccionaron todas las muestras tomadas en las líneas de flujo (ductos) junto con las respectivas muestras de referencia asociadas (39 pares de muestras), comparándose los valores medios mediante la t-Student para muestras pareadas (paired t-test). Se asume diferencia significativa (diferencia entre pares = 0) cuando el valor de p toma un valor inferior a 0,05.

Dado que los efectos sobre el suelo pueden variar a lo largo del tiempo, pudiendo el suelo recuperar con el tiempo sus condiciones originales, o persistir o incluso acentuarse los cambios con el tiempo, también se analizó el patrón temporal de las diferencias. Con este fin, mediante la técnica de regresión lineal se relacionaron las diferencias entre pares (valor de la muestra del ducto – valor de la muestra de referencia) con los años transcurridos desde la construcción del ducto (rango 4 a 14 años). Para cada variable independiente (parámetro del suelo), la regresión lineal resultante se utilizó para estimar el valor de la variable en el año 0 y 15 (corto y largo plazo, respectivamente), con los correspondientes intervalos de confianza al 95%. Se asume cambio significativo cuando el intervalo de confianza no incluye el valor 0 (diferencia nula entre ducto y referencia).

Con el fin de determinar los patrones emergentes de la diversidad florística entre los pastizales de coirón, se analizó el índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) y Equidad de Pielou ( $J'$ ) (Jost, 2018). A partir de esta información se realizó la prueba de Kruskal-Wallis con la corrección de Bonferroni, para detectar diferencias entre pastizales intervenidos por la línea de flujo y los de referencia, debido a que los datos no mostraron distribución normal (prueba de Shapiro-Wilk). Posteriormente, los datos de las coberturas de las especies se transformaron a  $\ln(a+1)$  y las variables ambientales por la expresión  $\sqrt{2} \cdot \ln(P_i)$ , para compensar las desviaciones provocadas por valores muy bajos y altos, según las recomendaciones de ter Braak (1995). Luego para evitar la multicolinealidad por variables pares fuertemente correlacionadas o redundantes en la matriz ambiental (propiedades del suelo), fueron identificadas a través de un análisis de correlación de Spearman. Como resultado, fueron seleccionadas 11 variables (pH, N, P, Ca, Mg, %MO, % Arena, % Limo, %Arcilla, Suelo desnudo y Mantillo) que se incluyeron en el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA, por sus siglas en inglés) con el fin de inferir las relaciones existentes entre las abundancias de las especies con las gradientes ambientales del suelo seleccionadas. Se realizó la prueba de permutación de Monte Carlo ( $p < 0,05$ ) basada en 9999 permutaciones aleatorias, para evaluar la significación estadística de las relaciones entre las especies y los factores ambientales.

Posteriormente, con el objetivo de evaluar cómo el origen de las especies vegetales (nativas o exóticas) influye en los diferentes hábitos de crecimiento (graminóides, hierbas, arbustos, etc.). Este enfoque permitió cuantificar la relación entre el origen de las especies y la distribución de los hábitos de crecimiento. Luego, para probar las diferencias entre los grupos formados se realizó un ANOSIM (Clarke & Green, 1988) utilizando el índice de similaridad de Dice, bajo la hipótesis nula de que no hay diferencias en la composición florística entre los dos grupos. Finalmente, para determinar la contribución de las especies en la estructuración de los grupos, se realizó un análisis SIMPER (Clarke, 1993), de modo de indicar cuantitativamente qué especies vegetales explican las diferencias entre grupos. Los análisis, tanto univariados como multivariados, se realizaron con el programa PAST (Palaeontological Statistics) v 4.0 (Hammer *et al.* 2001) y con el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.* 2011).

## RESULTADOS

Se reconocen 117 taxones y 106 especies, las cuales pertenecen a 32 familias y 69 géneros. Las plantas vasculares en total en este estudio estuvieron representadas por 99 especies, distribuidas en las siguientes Clases: 67 Magnoliopsidas, 31 Liliopsidas y 1 Lycopodiopsida. Las familias con el mayor número de especies fueron Asteraceae con 21 y 20 Poaceae. La gran mayoría de las familias, presentó un número reducido de especies (1 a 6). Para comprender la dinámica de la vegetación en el área de estudio, se llevó a cabo una clasificación de las especies identificadas de acuerdo con su origen. De las 106 especies, 92 son nativas (87%) y 14 introducidas (13%). El hábito de crecimiento se encuentra representado por 57 hierbas, 26 graminoides, 10 subarbustos, 7 líquenes (2 de talo folioso (*Pseudocyphellaria freycinetii* y *Pseudocyphellaria endochrysa*) y 5 de talo fruticoso (*Hypogymnia lugubris*, *Cetraria aculeata*, *Cetraria islandica*, *Thamnolia vermicularis* y *Sphaerophorus globosus*) y 6 arbustos. Además, a nivel de género se registraron 11 taxones los cuales corresponden a 4 líquenes (*Cladonia* sp., *Peltigera* sp., *Pseudocyphellaria* sp. y *Usnea* sp.), 3 graminoides (*Agrostis* sp., *Alopecurus* sp. y *Hordeum* sp.) 3 briófitas (*Bryum* sp., *Polytrichum* sp. y *Syntrichia* sp.) y 1 hierba (*Draba* sp.). Se reporta la presencia de una especie endémica *Galium araucanum* Phil. (Rodríguez & Marticorena, 2019). De acuerdo con el inventario Nacional de Especies del Ministerio del Medio Ambiente (2024), en la zona de estudio no se encontraron plantas vasculares con problemas de conservación. Pero se reporta la presencia de la especie *Austrolycopodium alboffii* (Sinónimo = *Lycopodium alboffii*) clasificada como de Preocupación Menor (LC) de acuerdo al Decreto Supremo N°38/2015 proceso 11) y se reporta la presencia *Hieracium pilosella*, una especie catalogada como invasora en pastizales nativos de uso ganadero (Domínguez & Santis 2021).

Se realizó una clasificación de especies por origen (nativa e introducida), estas se ordenaron de acuerdo a riqueza de especies promedio y error estándar presente en los ductos de línea de flujo y referencia en el continente (Fig. 2.). Por una parte, la línea de flujo presenta un promedio de  $15,57 \pm 2,23$  especies nativas y  $4,07 \pm 0,50$  introducidas, mientras que el área de referencia tiene un promedio de  $26,86 \pm 2,31$  especies nativas y  $4,14 \pm 0,44$  introducidas. Entre las especies introducidas destaca *Poa pratensis* por ser una planta forrajera de uso ganadero, establecida intencionalmente en año 1882 en Magallanes (Moore & Goodall, 1977). para aumentar la oferta nutricional para el ganado en los pastizales nativos (<https://web.inia.cl/herbariodigital/fichas/25-poa/>).

También se analizó la participación de las especies a nivel de cobertura entre coirones no intervenidos e intervenidos en relación a la cobertura de especies nativas e introducidas. Estas se ordenaron para el área de referencia las especies nativas tiene un promedio y error estándar de  $97,29 \pm 0,73$  y las especies introducidas una participación de  $2,71 \pm 0,73$ . En cambio, en la línea de flujo las especies nativas disminuyen en cobertura, pero siguen siendo importantes con un promedio y error estándar de  $72,84 \pm 6,12$  y las especies introducidas presentan un aumento en su cobertura de  $27,16 \pm 6,12$  (Fig. 2).

Además, se ordenaron las especies por su hábito de crecimiento de acuerdo a la riqueza de especies presentes. En el área de referencia se encontró un promedio de  $6,00 \pm 0,83$ , graminoides,  $14,71 \pm 1,51$  hierbas,  $3,36 \pm 0,42$  subarbustos,  $2,50 \pm 0,13$  arbustos,  $1,07 \pm 0,22$  briofitas y  $3,36 \pm 0,62$  líquenes (Fig. 4). En la línea de flujo las formas de vida más relevantes son los graminoides con un promedio ± error estándar de  $5,79 \pm 0,92$ , seguido por las hierbas con

Fig. 2.  
Riqueza de especies presentes en los ductos de línea de flujo y sitios de referencia, clasificadas por su origen nativa e introducida (promedio  $\pm$  error estándar). Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

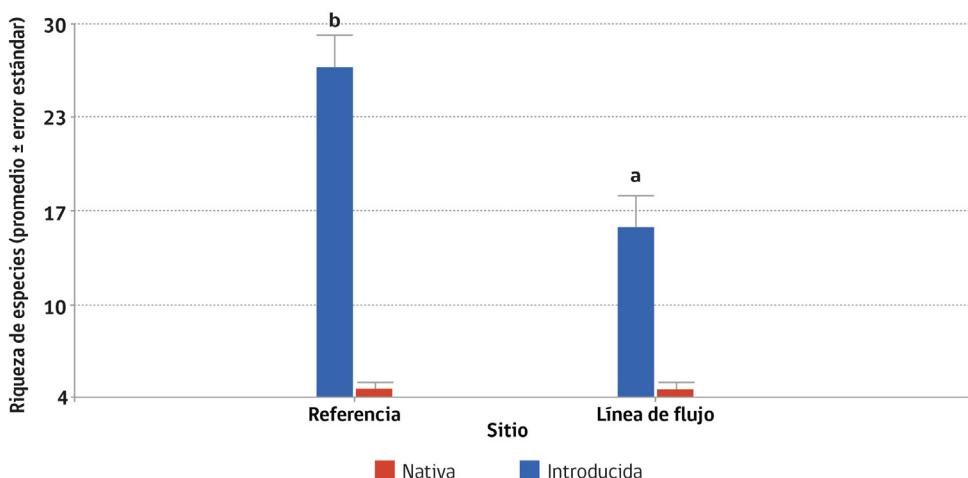
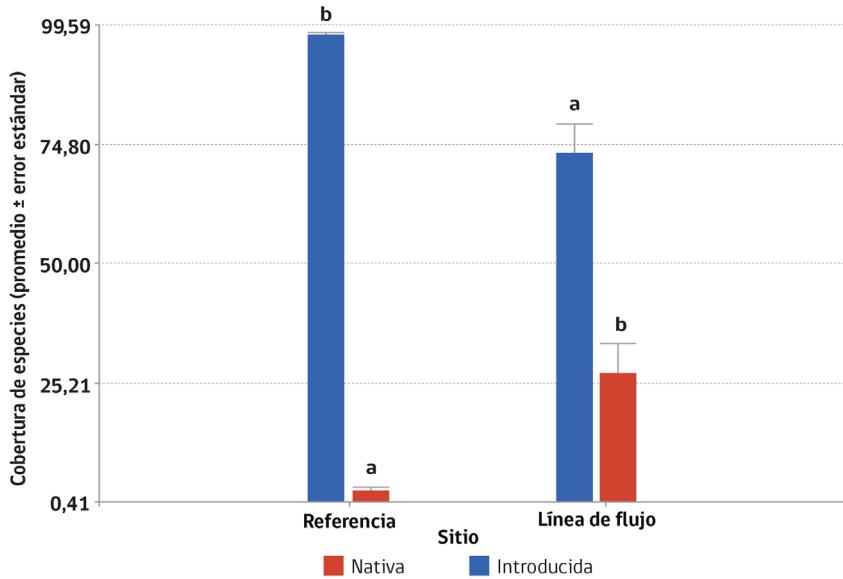


Fig. 3.  
Cobertura de las especies presentes en los ductos de línea de flujo y sitios de referencia, clasificadas por su origen nativa e introducida (promedio  $\pm$  error estándar). Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).



$9,79 \pm 1,53$ , subarbustos con  $1,64 \pm 0,32$ , arbustos con  $1,57 \pm 0,27$ , briofitas con  $0,71 \pm 0,22$ . Se destaca que en la línea de flujo no hubo presencia de líquenes. También se analizó la participación de hábitos de crecimiento a nivel de cobertura entre coírones. Estas se ordenaron para el área de referencia primero los graminoides con  $55,54 \pm 3,92$ , hierbas con  $10,78 \pm 2,09$ , subarbustos con  $20,11 \pm 4,58$ , arbustos con  $11,78 \pm 2,53$ , líquenes con  $1,23 \pm 0,32$  y briofitas con  $0,58 \pm 0,20$ . Para la línea de flujo los hábitos de crecimiento más importantes fueron las hierbas con  $45,34 \pm 3,79$  seguidas por los graminoides con  $43,38 \pm 3,88$  (Fig. 5).

Fig. 4.  
Riqueza promedio y error estándar del hábito de crecimiento presente en el área Referencia y en la Línea de Flujo. Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

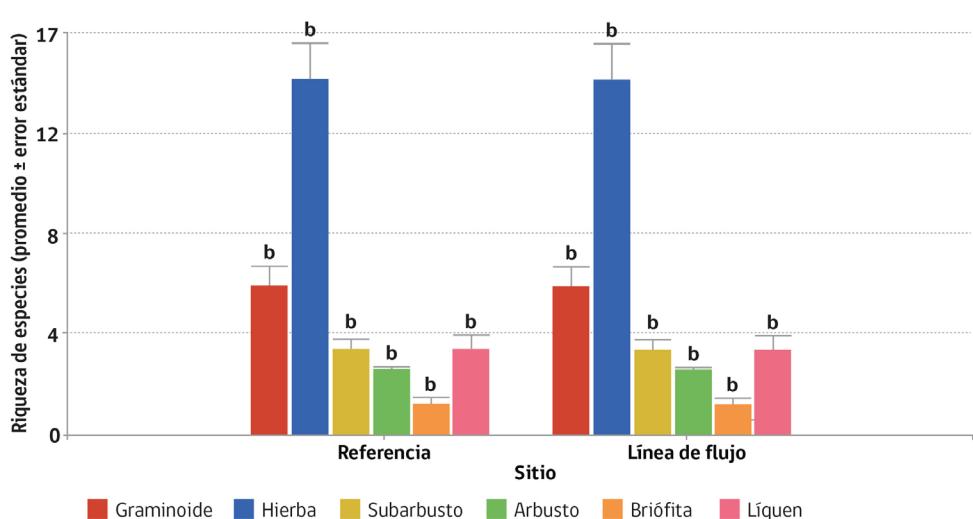
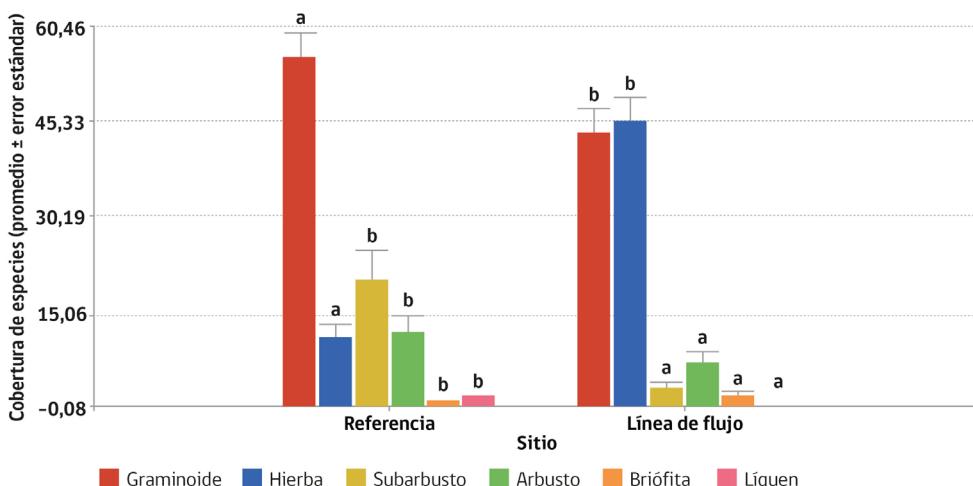


Fig. 5.  
Cobertura promedio y error estándar de hábito de crecimiento presente en el área Referencia y en la Línea de Flujo. Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).



La riqueza específica estimada ( $S$ ) para los coironales en la línea de flujo fue de  $19,64 \pm 9,90$  (promedio  $\pm$  D.E) para 221 parcelas de  $1\text{ m}^2$ , la cobertura vegetal (%) fue de  $36,2 \pm 19,6$  y el porcentaje de suelo desnudo fue de  $63,8 \pm 19,6$  (Tabla 1). La diversidad mediante el índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) fue de  $2,06 \pm 0,37$  (promedio  $\pm$  D.E) y el índice de Equidad de Pielou ( $J'$ ) fue de  $0,75 \pm 0,16$  (promedio  $\pm$  D.E). Por otra parte, la riqueza específica estimada ( $S$ ) para los coironales del área de referencia fue de  $31 \pm 9,61$  (promedio  $\pm$  D.E) para 221 parcelas de  $1\text{ m}^2$ , la cobertura vegetal fue de  $74,04 \pm 6,001$  y porcentaje de suelo desnudo (%) fue de  $25,96 \pm 6,001$ . La diversidad mediante el índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) fue de  $1,75 \pm 0,45$  (promedio  $\pm$  D.E) y el índice de Equidad de Pielou ( $J'$ ) fue de  $0,51 \pm 0,10$  (promedio  $\pm$  D.E) (Tabla 1).

Tabla 1.  
Promedio ( $\pm$  DE) de los parámetros comunitarios de biodiversidad: riqueza de especies (S), cobertura vegetal (%), suelo desnudo (%), índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) e índice de Pielou ( $J'$ ) para los coironales de Línea de flujo (LF) y Área de referencia (R) referencia ubicados en el continente.

Parámetros comunitarios	LF	R
Riqueza de especies (S)	19,64 $\pm$ 9,90 <sup>a</sup>	31 $\pm$ 9,61 <sup>b</sup>
Cobertura vegetal (%)	36,18 $\pm$ 19,6 <sup>a</sup>	74,04 $\pm$ 6,001 <sup>b</sup>
Suelo desnudo (%)	63,82 $\pm$ 19,6 <sup>a</sup>	25,96 $\pm$ 6,001 <sup>b</sup>
Shannon - Wiener ( $H'$ )	2,06 $\pm$ 0,37	1,75 $\pm$ 0,45
Pielou ( $J'$ )	0,75 $\pm$ 0,16 <sup>a</sup>	0,51 $\pm$ 0,10 <sup>b</sup>

Letras minúsculas distintas representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

En promedio, la mayoría de las variables del suelo no se vieron afectadas por los trabajos de construcción de los ductos, aunque sí cabe destacar algunas alteraciones significativas (Tabla 2). El pH del suelo aumentó ligeramente, resultando el aumento significativo para el pH de cambio ( $\text{pH en CaCl}_2$ ). También aumentaron significativamente los niveles totales de N, P y Mn, así como del nitrato, del  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de cambio y de la capacidad de intercambio iónico (CICE). Para el  $\text{Al}^{3+}$  de cambio y su % de saturación la observó una disminución significativa.

En cuanto a las propiedades físicas del suelo, la construcción de los ductos afectó significativamente a la capacidad de retener agua tanto a capacidad de campo como en el punto de marchitamiento permanente, disminuyendo de forma similar en los ductos ambas variables, sin afectar a la capacidad de retención de agua útil (diferencia en entre CC y PMP), al igual que no afectó ni a la densidad aparente ni a la porosidad del suelo. Finalmente apuntar que de las tres fracciones que determinan la textura del suelo, sólo el contenido de arcilla se vio afectado, disminuyendo significativamente en los ductos.

Propiedades	Unidades	Ducto	Referencia	p
pH $\text{H}_2\text{O}$		5,83 $\pm$ 0,55	5,77 $\pm$ 0,50	0,136
pH $\text{CaCl}_2$		5,00 $\pm$ 0,53	4,90 $\pm$ 0,50	0,008
M.O.	%	10,4 $\pm$ 4,93	11,1 $\pm$ 4,3	0,286
Stock C	Mg/ha	81,9 $\pm$ 38,1	78,9 $\pm$ 33,6	0,718
N	mg/kg	12,00 $\pm$ 10,09	8,37 $\pm$ 3,56	0,03
P	mg/kg	6,35 $\pm$ 2,35	5,21 $\pm$ 1,91	0,003
K	mg/kg	248 $\pm$ 170	256 $\pm$ 170	0,538
Zn	mg/kg	2,36 $\pm$ 1,66	2,11 $\pm$ 1,49	0,202
Fe	mg/kg	204 $\pm$ 114	222 $\pm$ 105	0,152
Cu	mg/kg	0,48 $\pm$ 0,19	0,44 $\pm$ 0,22	0,095
Mn	mg/kg	9,28 $\pm$ 6,12	6,91 $\pm$ 4,54	0,01
B	mg/kg	0,64 $\pm$ 0,29	0,70 $\pm$ 0,37	0,246
S- $\text{SO}_4^{2-}$	mg/kg	3,50 $\pm$ 3,39	3,09 $\pm$ 1,46	0,353
N- $\text{NO}_3^-$	mg/kg	7,77 $\pm$ 9,96	3,59 $\pm$ 3,27	0,02
N- $\text{NH}_4^+$	mg/kg	4,22 $\pm$ 2,26	4,78 $\pm$ 2,43	0,127
$\text{Ca}^{2+}$	cmol/kg	7,30 $\pm$ 2,87	6,52 $\pm$ 3,07	0,026
$\text{Mg}^{2+}$	cmol/kg	3,00 $\pm$ 1,05	2,65 $\pm$ 1,13	0,007

Tabla 2.  
Valores medios ( $\pm$  SD) de las propiedades del suelo afectados por la construcción de los ductos y de los respectivos pares de referencia (sin alterar). Incluye el valor p de significación de la comparación de los valores medios mediante la t-Student para datos apareados.

K <sup>+</sup>	cmol/kg	0,64 ± 0,44	0,65 ± 0,43	0,538
Na <sup>+</sup>	cmol/kg	0,44 ± 0,23	0,38 ± 0,14	0,083
Al <sup>3+</sup>	cmol/kg	0,54 ± 0,82	0,84 ± 1,16	0,003
CICE	cmol/kg	11,9 ± 3,5	11,0 ± 3,48	0,032
Sat Al	%	6,3 ± 10,0	11,7 ± 18,0	0,006
Arcilla	%	19,4 ± 8,3	21,6 ± 6,6	0,039
Limo	%	26,1 ± 7,6	25,2 ± 8,4	0,462
Arena	%	54,5 ± 10,6	53,4 ± 12,6	0,345
Porosidad	%	60,7 ± 11,4	63,6 ± 13,2	0,326
Cap. Campo	%	27,79 ± 8,6	31,09 ± 10,2	0,005
P.M.P.	%	22,70 ± 8,1	25,21 ± 8,6	0,042
Agua Útil	%	5,10 ± 2,90	5,88 ± 4,76	0,267
D Ap.	g cm <sup>-3</sup>	0,97 ± 0,30	0,89 ± 0,33	0,291

El patrón temporal de los cambios difirió mucho entre variables, pudiendo destacar los siguientes grupos (Figura 6):

Aumento inicial pero caída progresiva hasta alcanzar valores similares a los iniciales (efecto transitorio). Se observa para el pH, stock de carbono, Na<sup>+</sup>, CICE, Limo y Densidad aparente.

Disminución inicial, pero aumento progresivo hasta alcanzar valores similares a los iniciales (efecto igualmente transitorio): K total y de cambio (K<sup>+</sup>), Fe, B, Agua útil y porosidad.

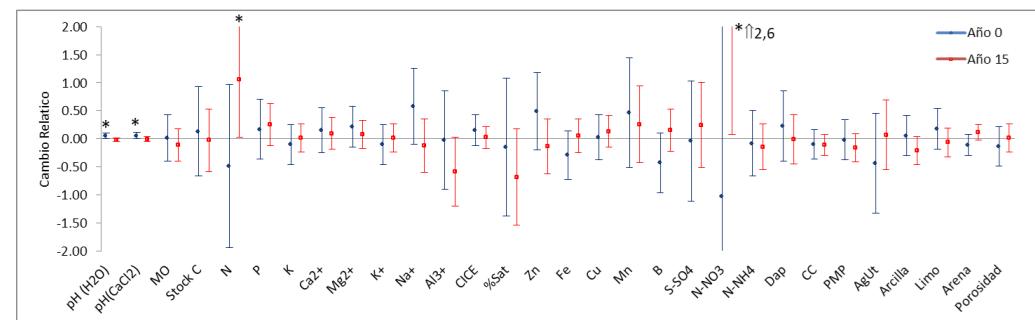
Aumento, que persiste o se acentúa con el tiempo: N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu y arena

Disminución, que persiste o se acentúa con el tiempo: Materia orgánica, NH4<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Sat Al, Zn, PMP, Arcilla.

No obstante, atendiendo a los intervalos de confianza, muy pocos de estos cambios pueden definirse como significativos: el aumento transitorio del pH y el aumento creciente de N y nitrato (Figura 6).

El CCA mostró que los ejes I y II explicaron el 56,4% de la variación florística total (Eje 1= 32,28 % y Eje 2 = 24,12%). La prueba de permutación de Monte Carlo para las 11 variables ambientales indicó que tanto el efecto global de las variables ambientales sobre las especies y el primer eje canónico resultaron significativos ( $p < 0,05$ ), y no se deben simplemente al azar. La figura 6 muestra una clara segregación entre dos tipos de vegetación: por un lado, la vegetación secundaria de coironales, ubicada en el extremo superior derecho del eje 1 (símbolos estrellas rojas, parte positiva del eje 1), asociada a las líneas de flujo; y por otro, la vegetación de referencia, situada en el extremo inferior izquierdo del mismo eje (símbolos círculos verdes, parte negativa), caracterizada por una mayor integridad ecológica. Esta separación sugiere una respuesta diferencial a los gradientes ambientales, aunque se observan dos sitios muy próximos entre sí, lo que probablemente se deba a su similitud en términos de riqueza de especies y cobertura

Fig. 6. Valores de cambio relativo en las propiedades del suelo, a corto y largo plazo (años 0 y 15, respectivamente), causados por la construcción de los ductos ( $(\mu_{\text{ducto}} - \mu_{\text{ref}})/\mu_{\text{ref}}$ ). Valores por encima y por debajo de la línea 0 indican, respectivamente, que aumentaron o disminuyeron tras los trabajos de construcción de los ductos. Comparando los dos valores de cada parámetro se define la tendencia en el tiempo (e.g., el cambio causado tiende a desaparecer, a perpetuarse o a aumentar). Las barras de error expresan el intervalo de confianza con un 95% de significación. Se considera cambio significativo si la barra de error no cruza la línea 0 (indicado con \*).



vegetal, indicando que uno de los sitios con coironal en línea de flujo podría encontrarse en un proceso avanzado de recuperación. En el eje 1, el vector más influyente en relación a su signo y magnitud de las flechas es el pH  $\text{H}_2\text{O}$  con signo (-) y con una magnitud de (-0,87) seguido por el % Arena (-0,41). Mientras que en el lado positivo destaca el porcentaje de materia orgánica % de M.O. con una magnitud de (0,57), junto con el % de Arcilla (0,18). Se puede interpretar que existe un gradiente de perturbación superficial: desde más suelo desnudo, más arenoso y con pH más alto (lado positivo) hacia más mantillo, mayor M.O. y algo más de finos (lado negativo). En restauración, este eje suele capturar estado de cobertura (protección vs. exposición). En el eje 2, en relación a su signo y magnitud de las flechas el vector más relevante es el Suelo desnudo con signo (+) y con magnitud de (0,73), seguido por el % de Arena (0,31) y pH (0,30). Mientras que en el lado negativo adquiere importancia en términos de magnitud el Mantillo (-0,61), % M.O. (-0,28) y la % Arcilla (-0,44). Se puede interpretar que existe un gradiente de perturbación superficial: desde más suelo desnudo, más arenoso y con pH más alto (lado positivo) hacia más mantillo, mayor M.O. y algo más de finos (lado negativo). En restauración, este eje suele capturar estado de cobertura (protección vs. exposición) (Fig. 7).

El (CCA) reveló que la variable Suelo desnudo, con el vector de mayor longitud en el eje 2 positivo, está asociada a sitios más erosionados o perturbados y se vincula con especies como Air\_car (*Aira caryophyllea*), Poa\_pra (*Poa pratensis*) y Rum\_ace (*Rumex acetosella*), todas tolerantes a la exposición y características de comunidades en etapas tempranas de sucesión. La variable % Arena, con vector de magnitud media en el cuadrante superior derecho y cercana a "Suelo desnudo", se asocia a sustratos sueltos y poco retenedores, relacionándose con Aca\_pin (*Acaena pinnatifida*), Poa\_spi (*Poa spiciformis*) y Bry\_sp. (*Bryophyta* sp.). Por su parte, la % de Materia Orgánica (M.O.), con una dirección hacia el eje 1 positivo y eje 2 negativo, refleja zonas con acumulación de restos vegetales o en recuperación activa, y se relaciona con Ber\_emp (*Berberis empetrifolia*), Per\_pil (*Perezia pilifera*) y Gau\_pum (*Gaultheria pumila*), especies presentes en áreas con mayor cobertura vegetal. La variable % de Arcilla, ubicada en el eje 1 y 2 negativos, representa suelos finos y con mayor capacidad de retención, asociándose con Ber\_mic (*Berberis microphylla*), Cet\_acu (*Cetraria aculeata*) y Emp\_rub (*Empetrum rubrum*), las cuales indican mayor estabilidad edáfica. La variable Mantillo, con un vector más corto, pero bien definido en el eje 2 negativo, se asocia los pastizales con mayor cobertura superficial, y se relaciona con las especies: Cet\_isl (*Cetraria islandica*), Tar\_gil (*Taraxacum gilliesii*) y Pse\_fre (*Pseudocyphellaria freycinetii*), que podrían representar fases intermedias o avanzadas de estabilización. Finalmente, el pH, dirigido hacia el eje 1 negativo, refleja suelos más ácidos, con especies asociadas como Jun\_buf (*Juncus bufonius*), Pla\_mar (*Plantago maritima*) y Ryt\_vir (*Rytidosperma virescens*), las cuales

Fig. 7. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA). Muestran los vectores de las 6 variables ambientales analizadas. Las estrellas rojas corresponden a los coironales de la línea de flujo, mientras que los círculos verdes representan los coironales del área de referencia. Los dos primeros ejes del CCA explicaron el 56,4 % de la variación florística total (valor  $p = 0,001$ ), siendo el Eje I responsable del 32,28 % y el Eje II del 24,12 % de dicha variación.

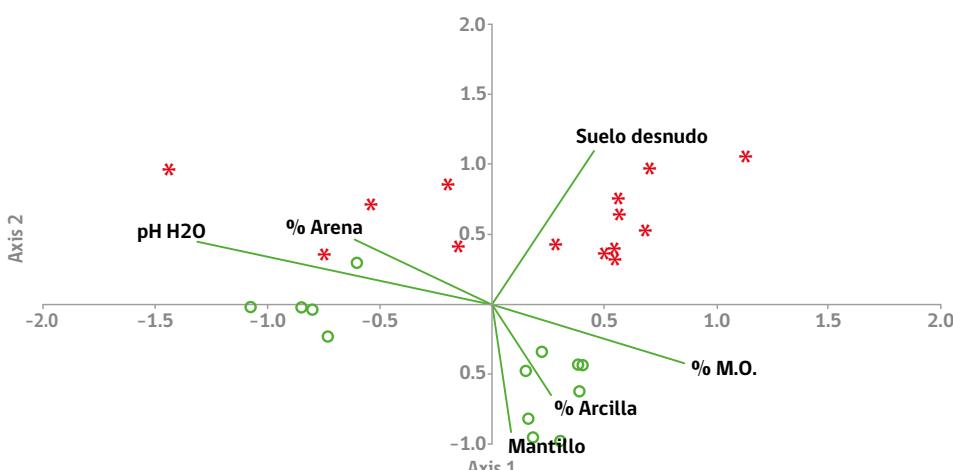
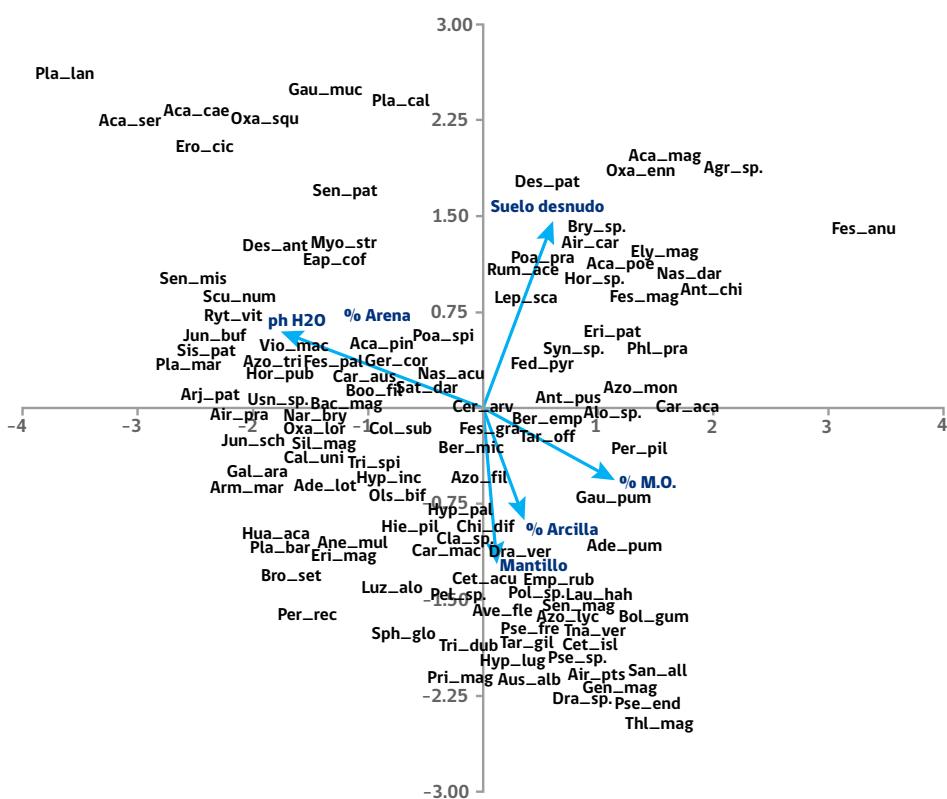


Fig. 8. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA). Se muestran los vectores de las seis variables ambientales analizadas y la distribución de las especies registradas en las líneas de flujo y en los sitios de referencia en coironales. Los dos primeros ejes del CCA explicaron el 56,4 % de la variación florística total (valor  $p = 0,001$ ), siendo el Eje I responsable del 32,28 % y el Eje II del 24,12 % de dicha variación.



prefieren condiciones edáficas menos intervenidas (Figura 8). Aunque hay una superposición entre los grupos, esta no es lo suficientemente significativa como para no evidenciar la presencia de dos grupos distintos. Estos datos coinciden con lo obtenido en el análisis ANOSIM, el cual sumado con el índice de distancia de Bray-Curtis, mostraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ( $R = 0,78$ ;  $p = 0,0001$ ).

El análisis SIMPER (Tabla 3) permitió identificar las especies que más contribuyen a las

diferencias florísticas entre los sitios de referencia y las zonas afectadas por la línea de flujo. *Festuca gracillima* fue la especie que mayor contribución tuvo a la disimilitud (35,57%), siendo muy abundante en el sitio de referencia, pero escasa en la línea de flujo. Le siguieron *Empetrum rubrum* (8,5%), *Acaena poeppigiana* (5,97%), *Poa pratensis* (5,56%) y *Berberis microphylla* (3,53%). En conjunto, las primeras cinco especies explican más del 50% de la disimilitud observada, lo que proporciona una base sólida para proponer especies indicadoras de degradación o conservación del hábitat (Tabla 3). Por otra parte, las especies que presentaron mayor abundancia en la línea de flujo, sugiriendo una mayor tolerancia o ventaja competitiva en condiciones alteradas y al pastoreo fueron: *Poa pratensis*, *Acaena poeppigiana*, *Taraxacum officinale*, *Rumex acetosella*, *Anthoxanthum pusillum*, *Acaena magellanica* y *Hordeum pubiflorum*.

Especies	Origen	Hábito	Contribución %	Cobertura promedio R	Cobertura promedio LF
<i>Festuca gracillima</i>	Nativa	Hierba	35,57	35,9	4,91
<i>Empetrum rubrum</i>	Nativa	Subarbusto	8,505	7,33	0,268
<i>Acaena poeppigiana</i>	Nativa	Hierba	5,972	0,882	5,73
<i>Poa pratensis</i>	Introducida	Graminoide	5,565	0,407	6,12
<i>Berberis microphylla</i>	Nativa	Arbusto	3,535	3,3	1,28
<i>Baccharis magellanica</i>	Nativa	Subarbusto	2,521	2,3	0,0179
<i>Azorella trifurcata</i>	Nativa	Subarbusto	2,461	2,03	0,384
<i>Hieracium pilosella</i>	Introducida	Hierba	2,226	1,5	0,929
<i>Acaena pinnatifida</i>	Nativa	Hierba	2,05	1,6	0,91
<i>Chiliotrichum diffusum</i>	Nativa	Arbusto	1,871	1,61	0,331
<i>Anthoxanthum pusillum</i>	Nativa	Graminoide	1,793	0,614	1,32
<i>Azorella lycopodioides</i>	Nativa	Subarbusto	1,617	1,38	0,0536
<i>Nardophyllum bryoides</i>	Nativa	Subarbusto	1,517	1,24	0,29
<i>Festuca pallescens</i>	Nativa	Graminoide	1,449	1,29	0,0107
<i>Rumex acetosella</i>	Introducida	Hierba	1,435	0,213	1,4
<i>Acaena magellanica</i>	Nativa	Hierba	1,344	0,0221	1,24
<i>Taraxacum officinale</i>	Introducida	Hierba	1,262	0,814	0,729
<i>Hordeum pubiflorum</i>	Nativa	Graminoide	1,135	0,529	0,824
<i>Gaultheria pumila</i>	Nativa	Subarbusto	1,04	0,843	0,284
<i>Carex austroamericana</i>	Nativa	Graminoide	0,964	0,709	0,351
<i>Acaena sericea</i>	Nativa	Hierba	0,9314	0,0157	0,819
<i>Bolax gummifera</i>	Nativa	Subarbusto	0,9048	0,73	0,0307
<i>Deschampsia patula</i>	Nativa	Graminoide	0,8095	0,045	0,726
<i>Berberis empetrifolia</i>	Nativa	Subarbusto	0,805	0,59	0,266
<i>Rytidosperma virescens</i>	Nativa	Graminoide	0,7625	0,321	0,517
<i>Systrichia sp.</i>	Nativa	Briofita	0,6947	0,393	0,472
<i>Austrolycopodium alboffi</i>	Nativa	Hierba	0,6591	0,579	0,00143
<i>Colobanthus subulatus</i>	Nativa	Hierba	0,5855	0,481	0,187

Tabla 3.  
Especies que contribuyen a diferenciar la composición florística de los pastizales analizados (LF = Línea de flujo, R = Área de referencia) de acuerdo al análisis SIMPER. Las especies que contribuyen principalmente (en porcentaje) a cada grupo están marcadas en negrita.

<i>Carex acaulis</i>	Nativa	Graminoide	0,5808	0,244	0,388
<i>Cerastium arvense</i>	Introducida	Hierba	0,5784	0,399	0,276
<i>Viola maculata</i>	Nativa	Hierba	0,5735	0,445	0,155
<i>Agrostis sp.</i>	Nativa	Graminoide	0,4756	0	0,446
<i>Eriachaenium magellanicum</i>	Nativa	Hierba	0,4668	0,177	0,376
<i>Poa spiciformis</i>	Nativa	Graminoide	0,4346	0,216	0,285
<i>Luzula alopecurus</i>	Nativa	Graminoide	0,4248	0,375	0,0171
<i>Festuca arundinacea</i>	Introducida	Graminoide	0,4244	0	0,406
<i>Erigeron patagonicus</i>	Nativa	Hierba	0,4132	0,0886	0,398
<i>Pseudocyphellaria freycinetii</i>	Nativa	Liquen	0,3789	0,324	0,00429
<i>Avenella flexuosa</i>	Nativa	Graminoide	0,2988	0,264	0,00286
<i>Juncus bufonius</i>	Nativa	Graminoide	0,2933	0,25	0,025
<i>Perezia recurvata</i>	Nativa	Hierba	0,2771	0,25	0
<i>Azorella filamentos</i>	Nativa	Hierba	0,2271	0,177	0,0429
<i>Pseudocyphellaria sp.</i>	Nativa	Liquen	0,1844	0,161	0
<i>Leptinella scariosa</i>	Nativa	Hierba	0,1789	0,00786	0,174
<i>Hypochaeris incana</i>	Nativa	Hierba	0,1634	0,138	0,0257
<i>Nassauvia aculeata</i>	Nativa	Hierba	0,1576	0,0729	0,0979
<i>Geranium core-core</i>	Nativa	Hierba	0,1503	0,085	0,0879
<i>Armeria maritima</i>	Nativa	Hierba	0,1473	0,125	0,0136
<i>Nassauvia darwinii</i>	Nativa	Hierba	0,1428	0,0164	0,127
<i>Micromeria darwinii</i>	Nativa	Subarbusto	0,1411	0,0921	0,0543
<i>Galium araucanum</i>	Nativa	Hierba	0,135	0,111	0,0293
<i>Alopecurus sp.</i>	Nativa	Graminoide	0,1262	0,0143	0,114
<i>Primula magellanica</i>	Nativa	Hierba	0,1246	0,109	0
<i>Adesmia lotoides</i>	Nativa	Hierba	0,1228	0,111	0,00643
<i>Hordeum sp.</i>	Nativa	Graminoide	0,1131	0,00143	0,114
<i>Cladonia sp.</i>	Nativa	Liquen	0,1128	0,1	0
<i>Aira praecox</i>	Introducida	Graminoide	0,1109	0,1	0,00429
<i>Peltigera sp.</i>	Nativa	Liquen	0,1053	0,0964	0
<i>Azorella monantha</i>	Nativa	Subarbusto	0,1039	0,0471	0,0629
<i>Bromus coloratus</i>	Nativa	Graminoide	0,1027	0	0,111
<i>Juncus scheuchzerioides</i>	Nativa	Graminoide	0,1002	0,00214	0,125
<i>Arjona patagonica</i>	Nativa	Hierba	0,09757	0,0764	0,0221
<i>Senecio miser</i>	Nativa	Subarbusto	0,09629	0,035	0,0636
<i>Erodium cicutarium</i>	Introducida	Hierba	0,09601	0	0,0929
<i>Plantago lanceolata</i>	Nativa	Hierba	0,09175	0,00143	0,0793

<i>Perezia pilifera</i>	Nativa	Hierba	0,08746	0,0407	0,0536
<i>Calceolaria uniflora</i>	Nativa	Hierba	0,08719	0,0786	0,00429
<i>Acaena caespitosa</i>	Nativa	Hierba	0,06397	0	0,0579
<i>Scutellaria nummulariifolia</i>	Nativa	Hierba	0,06067	0,02	0,0436
<i>Plantago maritima</i>	Nativa	Hierba	0,06022	0,045	0,0121
<i>Festuca magellanica</i>	Nativa	Graminoide	0,0595	0,00286	0,06
<i>Senecio magellanicus</i>	Nativa	Hierba	0,0587	0,0486	0
<i>Elymus magellanicus</i>	Nativa	Graminoide	0,05704	0,045	0,005
<i>Polytrichum sp.</i>	Nativa	Briofita	0,05691	0,0464	0,00429
<i>Bryum sp.</i>	Nativa	Briofita	0,05395	0	0,0507
<i>Carex sorianoi</i>	Nativa	Graminoide	0,04148	0	0,045
<i>Oxalis enneaphylla</i>	Nativa	Hierba	0,03999	0,0143	0,0271
<i>Cetraria aculeata</i>	Nativa	Liquen	0,03973	0,0329	0,00429
<i>Antennaria chilensis</i>	Nativa	Hierba	0,03805	0,00643	0,0314
<i>Phleum pratense</i>	Introducida	Graminoide	0,03758	0,0164	0,0221
<i>Cetraria islandica</i>	Nativa	Liquen	0,03547	0,03	0
<i>Bromus setifolius</i>	Nativa	Graminoide	0,03337	0,03	0
<i>Usnea sp.</i>	Nativa	Liquen	0,03209	0,0286	0
<i>Sphaerophorus globosus</i>	Nativa	Liquen	0,03196	0,0271	0
<i>Olsynium biflorum</i>	Nativa	Hierba	0,02267	0,0143	0,00929
<i>Festuca pyrogea</i>	Nativa	Graminoide	0,02078	0,00429	0,0186
<i>Anemone multifida</i>	Nativa	Hierba	0,01917	0,0179	0
<i>Azorella acaulis</i>	Nativa	Hierba	0,01499	0,0121	0,00143
<i>Leucheria hahnii</i>	Nativa	Hierba	0,01415	0,0121	0
<i>Deschampsia antarctica</i>	Nativa	Graminoide	0,0128	0,00714	0,00643
<i>Gentianella magellanica</i>	Nativa	Hierba	0,01258	0,0107	0
<i>Myosotis stricta</i>	Nativa	Hierba	0,01251	0	0,0136
<i>Aira caryophyllea</i>	Introducida	Graminoide	0,0114	0	0,0107
<i>Taraxacum gilliesii</i>	Nativa	Hierba	0,01089	0,00929	0
<i>Gaultheria mucronata</i>	Nativa	Arbusto	0,01063	0	0,01
<i>Thamnolia vermicularis</i>	Nativa	Liquen	0,01029	0,00857	0
<i>Draba verna</i>	Nativa	Hierba	0,0101	0,00929	0
<i>Carex macroura</i>	Nativa	Graminoide	0,0101	0,00929	0
<i>Trisetum spicatum</i>	Nativa	Graminoide	0,0101	0,00571	0,00429
<i>Sisyrinchium patagonicum</i>	Nativa	Hierba	0,008528	0,00571	0,00286
<i>Senecio alloeophyllus</i>	Nativa	Subarbusto	0,007795	0,00643	0
<i>Senecio patagonicus</i>	Nativa	Subarbusto	0,007513	0,00643	0
<i>Boopis filifolia</i>	Nativa	Hierba	0,00749	0,00286	0,00429

<i>Hypochoeris palustris</i>	Nativa	Hierba	0,005908	0,005	0
<i>Arjona pusilla</i>	Nativa	Hierba	0,00544	0,005	0
<i>Plagiobothrys calandrinioides</i>	Nativa	Hierba	0,005315	0	0,005
<i>Trifolium dubium</i>	Nativa	Hierba	0,005047	0,00429	0
<i>Hypogymnia lugubris</i>	Nativa	Líquen	0,004877	0,00429	0
<i>Silene magellanica</i>	Nativa	Hierba	0,004556	0,00429	0
<i>Oxalis loricata Dusén</i>	Nativa	Hierba	0,004158	0,00214	0,00214
<i>Pseudocypellaria endochrysa</i>	Nativa	Líquen	0,004116	0,00357	0
<i>Plantago barbata</i>	Nativa	Hierba	0,003063	0,00286	0
<i>Thlaspi magellanicum</i>	Nativa	Hierba	0,00183	0,00143	0
<i>Draba sp.</i>	Nativa	Hierba	0,001646	0,00143	0
<i>Carex gayana</i>	Nativa	Graminóide	0,001597	0,00143	0
<i>Oxalis squamoso-radicosa</i>	Nativa	Hierba	0,001579	0	0,00143
<i>Adesmia pumila</i>	Nativa	Hierba	0,001164	0,0000357	0,00143

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para los pastizales de coirón de *Festuca gracillima* en la estepa árida de Magallanes muestran una clara alteración de la estructura florística, composición funcional y cobertura vegetal en los sitios afectados por ductos de hidrocarburos, aspecto ya informado en varios estudios previos en el hemisferio norte (e.g., Brehm & Culman, 2022; Zhao *et al.* 2022, Soulodre, 2022). A pesar de la técnica de construcción de "elevación doble", reconocida por minimizar la mezcla de horizontes edáficos (Neilsen *et al.* 1990), se evidenció una significativa reducción de la cobertura vegetal ( $36,2 \pm 19,6\%$ ) y un aumento del suelo desnudo ( $63,8 \pm 19,6\%$ ) en la línea de flujo, en comparación con los sitios de referencia ( $74,04 \pm 6,0\%$  y  $25,96 \pm 6,0\%$ ) respectivamente.

Este patrón es consistente con estudios previos realizados en otras regiones áridas y frágiles del mundo, donde la instalación de ductos ha generado efectos prolongados sobre la vegetación. Brehm & Culman (2022) señalan que incluso en condiciones templadas, los impactos sobre la cobertura y composición vegetal pueden persistir por más de una década, dependiendo de factores como la compactación del suelo, la pérdida de materia orgánica y la alteración de microhábitats. De hecho, se ha documentado que las perturbaciones físicas derivadas del tráfico de maquinaria y la excavación del ducto reducen significativamente la porosidad del suelo, afectando negativamente la germinación y el establecimiento de especies nativas (Shi *et al.* 2014; Naeth *et al.* 2020).

Sin embargo, en este estudio sólo se observaron cambios menores o transitorios en las propiedades del suelo. Aunque con la construcción de los ductos disminuyó ligeramente el porcentaje de arcillas en los primeros 15 cm del suelo, disminuyendo la retención de agua tanto la capacidad de campo como el punto de marchitamiento permanente, ni la densidad aparente, ni la porosidad, ni la capacidad de retención de agua útil se vieron alteradas. Además, los cambios observados tendieron mayoritariamente a desvanecerse con el tiempo. Lo mismo cabe señalar para la mayoría de las propiedades químicas del suelo. El aumento del pH del suelo sólo se

observó en los primeros años tras los trabajos de construcción. Destacar que ni la concentración de materia orgánica ni el stock de carbono en el suelo se vieron significativamente afectados. Los resultados también muestran la alta resiliencia de los suelos estudiados, pues sólo experimentan cambios menores que remiten a medio plazo (Corstanje *et al.* 2015). Esta resiliencia explica en muchos casos los escasos cambios o la rápida recuperación de las comunidades edáficas tras los trabajos de alteración ocasional de los suelos (Hirsch *et al.* 2015).

Desde una perspectiva funcional, los pastizales de coirón en la línea de flujo muestran una simplificación estructural, con predominio de hierbas anuales y reducción de formas leñosas como subarbustos y líquenes, lo que indica un retroceso en la sucesión ecológica. Estos hallazgos coinciden con los planteamientos de Avirmed *et al.* (2014), quienes sugieren que la intervención agronómica con siembras forrajeras y fertilización, puede generar un segundo impacto al favorecer especies de rápido crecimiento como las asilvestradas *Poa pratensis* y *Rumex acetosella*. Sin embargo, gracias a estas especies se puede aumentar la cobertura vegetal, lo cual permite estabilizar el suelo, reducir la erosión y mejorar la retención de humedad. En sistemas perturbados, especialmente donde la sucesión natural es lenta, esta "cobertura rápida" es clave para proteger el suelo y las semillas que lleguen más tarde de las áreas aledañas. Si bien el índice de Shannon-Wiener fue ligeramente mayor en los sitios intervenidos ( $H' = 2,06 \pm 0,37$ ), esta aparente mayor diversidad alfa puede interpretarse por la inclusión de especies oportunistas e introducidas (Zhao *et al.* 2022).

En este estudio sólo el nitrógeno y su fracción mineral en forma de nitrato mostró resultados preocupantes. En ambos casos se produjo una disminución inicial, para aumentar posteriormente hasta alcanzar a largo plazo (15 años) valores significativamente superiores a los encontrados en las zonas de referencia. La disminución inicial podría explicarse por una reducción de la cobertura vegetal, lo que disminuye el aporte de exudados radiculares, fundamentales para la simbiosis micorrícica, bacterias fijadoras de nitrógeno y otros grupos (Ma *et al.* 2022), lo que implica una pérdida inicial del nitrógeno disponible. El aumento posterior puede explicarse como una eutrofización antrópica del sistema, con sus potenciales riesgos de contaminación por lixiviación de nitratos, pero también con posibles repercusiones positivas para el carbono del suelo (Xu *et al.* 2021) y la productividad vegetal, pero quizás negativas para su diversidad (Ren *et. al.* 2023).

En este sentido, los resultados de Ferrante *et al.* (2023) complementan esta interpretación, ya que, en pastizales roturados y sembrados en ambientes semiáridos de Patagonia Argentina, la regeneración vegetal fue fuertemente modulada por variables edáficas, destacándose el contenido de calcio y la salinidad del suelo como factores limitantes clave para el establecimiento de especies nativas. Aunque en nuestro caso el contenido de calcio no mostró diferencias significativas, la evidencia sugiere que, en ambos sistemas, la restauración por recolonización natural puede verse condicionada por la disponibilidad de nutrientes y la calidad del sustrato.

Una característica destacada en el presente estudio es la persistencia de especies pioneras y tolerantes a la perturbación, como *Poa pratensis*, *Rumex acetosella* y *Taraxacum officinale*, en las áreas afectadas por los ductos (línea de flujo), en detrimento de especies nativas clave como *Festuca gracillima* y *Empetrum rubrum*, cuya cobertura se redujo drásticamente. De manera análoga, Ferrante *et al.* (2023) documentaron una dominancia inicial de especies introducidas, como *Agropyron* sp. y *Dactylis glomerata*, en pasturas roturadas y sembradas, las cuales fueron progresivamente reemplazadas por especies nativas únicamente en sitios con condiciones edáficas más favorables. Esto sugiere un patrón común en ambientes perturbados, donde las especies exóticas o ruderales tienden a establecerse rápidamente tras el disturbio, pero pueden ser desplazadas gradualmente por especies nativas si las condiciones ambientales (clima y suelo) y el pastoreo lo permiten.

Estos resultados coinciden también con lo reportado por Desserud *et al.* (2010) y Xiao *et al.* (2014), quienes observaron un reemplazo de especies perennes de alto valor ecológico por especies introducidas o ruderales en corredores de ductos construidos en zonas montañosas de Norteamérica y en ecosistemas de estepa desértica de Asia, respectivamente.

Por último, el análisis de correspondencia canónica (CCA) reveló una fuerte asociación entre los gradientes de perturbación (p.ej., suelo desnudo, % arena) y la segregación florística entre los coironales intervenidos y de referencia. Esto apoya la idea de que, aunque la recuperación natural puede progresar, su trayectoria está altamente condicionada por las propiedades físicas del sustrato y la disponibilidad de propágulos nativos, como también ha sido evidenciado por Elsinger *et al.* (2022) y Soulodre *et al.* (2022).

El análisis SIMPER reveló que especies introducidas o naturalizadas como *Poa pratensis*, *Taraxacum officinale* y *Rumex acetosella*, junto con la nativa, pero ruderaria *Acaena poeppigiana*, presentan una alta cobertura en las zonas de línea de flujo, lo que sugiere una ventaja competitiva significativa bajo condiciones de perturbación. Estas especies comparten rasgos funcionales como alta plasticidad fenotípica, reproducción clonal o por semilla abundante, y tolerancia a suelos desnudos o compactados, características ampliamente reconocidas en contextos de sucesión temprana o ambientes alterados (Dollenz, 1991; Dollenz & Ivanovic, 1996; Xiao *et al.* 2014; Soulodre *et al.* 2022). Por otra parte, *Poa pratensis* históricamente introducida para mejorar el forraje en Magallanes (Moore & Goodall, 1977) mostró una cobertura promedio de 6,1% en los ductos, esto indica su capacidad colonizadora de sitios perturbados por ductos lo que se ajusta a lo descrito por (Desserud & Naeth, 2013), mientras que su presencia fue marginal en áreas de referencia. Por su parte, *Acaena poeppigiana* logró incrementar su cobertura cinco veces en la línea de flujo, posiblemente beneficiándose de una menor competencia interespecífica.

Una observación relevante es el comportamiento de *Hieracium pilosella*, una especie invasora reconocida en los pastizales del sur de Chile (Domínguez & Santis, 2021), que, contra lo esperado, mostró mayor cobertura en los sitios de referencia (1,5%) que en la línea de flujo (0,93%) (Tabla 3). Esta distribución puede explicarse por una menor tolerancia de *H. pilosella* a condiciones extremas como suelo desnudo, alta exposición solar o baja humedad superficial, características típicas de las etapas iniciales tras la instalación de ductos. Alternativamente, la especie podría responder mejor a perturbaciones intermedias, como el pastoreo extensivo, donde hay cierta alteración, pero también micro hábitats protegidos de acuerdo a lo reportado por Cipriotti *et al.* (2010), quienes encontraron que niveles intermedios de cobertura vegetal favorecen la invasión de *H. pilosella*. Estos resultados subrayan la importancia de diferenciar entre especies oportunistas y verdaderamente invasoras.

Finalmente, los resultados sugieren que los posibles efectos de las líneas de flujo de gasoductos u oleoductos se restringen principalmente a la zona directamente intervenida. En este sector, se observa una reducción marcada de la cobertura y riqueza florística, junto con una simplificación funcional del ensamblaje vegetal, caracterizada por la dominancia de especies oportunistas e introducidas con función protectora del suelo. En contraste, las áreas ubicadas a 20–30 metros del eje del ducto mostraron valores de vegetación y propiedades edáficas comparables a las zonas de referencia definidas para este estudio, si bien no es posible descartar completamente algún nivel de alteración debido a que el diseño experimental no permite demostrarlo de manera formal.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a quienes colaboraron con el trabajo de campo (Ángel Suárez y Joaquín Romo).

## LITERATURA CITADA

- Avirmed, O.I., Burke, C., Mobley, M.L., Lauenroth, W.K., & Schlaepfer, D.R. (2014). Natural recovery of soil organic matter in 30–90-year-old abandoned oil and gas wells in sagebrush steppe. *Ecosphere*, 5: 24. <https://doi.org/10.1890/ES13-00272.1>
- Brehm, T., & Culman, S. (2022). Efectos de la instalación de tuberías en suelos y plantas: Una revisión y síntesis cuantitativa. *Agrosistemas, Geociencias y Medio Ambiente*, 5, E20312. <https://doi.org/10.1002/agg2.20312>
- Bruun, H. H., Moen, J., Virtanen, R., Grytnes, J.-A., Oksanen, L., & Angerbjörn, A. (2006). Effects of altitude and topography on species richness of vascular plants, bryophytes and lichens in alpine communities. *Journal of Vegetation Science*, 17, 37–46
- Call, C. A., & Roundy, B. A. (1991). Perspectives and processes in revegetation of arid and semiarid rangelands. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 44(6), 543–549.
- Cipriotti, P. A., Rauber, R. B., Collantes, M. B., Braun, K., & Escartín, C. (2009). Hieracium pilosella invasion in the Tierra del Fuego steppe, Southern Patagonia. *Biological Invasions*, 12(8), 2523–2535. <https://doi.org/10.1007/s10530-009-9661-7>
- CIREN (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. Región de Magallanes y Antártica Chilena. Síntesis de Resultados – Centro de Información de Recursos Naturales, Publicación diciembre, No 153.
- Clarke, K.R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of change in community structure. *Australian Journal of Ecology*: 18: 117–143.
- Clarke, K.R., & Green, R.H. (1988). Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. *Marine Ecology Progress Series*, 46: 213–226.
- Collantes, M. & Faggi, A.M. (1999). Los humedales del sur de Sudamérica (pp. 15–25). En A. I. Malvárez (Ed.), *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. UNESCO.
- Correa, M.N. (1969, 1971, 1978, 1984, 1985, 1988, 1999). *Flora Patagónica I–VIII. Colección Científica INTA*.
- Corstanje, R., Deeks, L. R., Whitmore, A. P., Gregory, A. S., & Ritz, K. (2015). Probing the basis of soil resilience. *Soil Use and Management*, 31, 72–81.
- del Mar González, F., & Pérez, D. R. (2024). How much can assisted natural regeneration contribute to ecological restoration in arid lands?. *Land Degradation & Development*, 35(14), 4163–4172.
- Desserud, P., Gates, C. C., Adams, B., & Revel, R. D. (2010). Restoration of foothills rough fescue grassland following pipeline disturbance in southwestern Alberta. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2763–2770. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.006>
- Desserud, P. A., & Naeth, M. A. (2013). Natural recovery of rough fescue (*Festuca hallii* (Vasey) Piper) grassland after disturbance by pipeline construction in central Alberta, Canada. *Natural Areas Journal*, 33(1), 91–98. <https://doi.org/10.3375/043.033.0111>
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2011). InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com>.
- Dollenz, O. A. (1991). Capacidad de colonización de *Rumex acetosella* L. (vinagrillo) en comunidades perturbadas. *Anales del Instituto de la Patagonia: Serie Ciencias Naturales*, 20(1), 61–67.
- Dollenz, O., & Ivanovic, J. (1996). Sucesión secundaria en un pastizal incendiado en el Parque Nacional Torres del Paine, Magallanes, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 24, 15–28.
- Domínguez D., E. Suárez N., Á. Navarro, E. Romo, J. Alarcón, M & Seguich, M. (2022). Monitoreo de la cubierta vegetal para evaluar la sucesión secundaria de los pastizales nativos en la línea de flujo ducto Dorado Sur ZG-1 (ex A). Punta Arenas, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Informativo INIA Kampenaike, N° 123. 4 p. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68709> (Consultado el 7 de julio de 2025).

- Domínguez, E. & Santis, P. (2021). Plantas naturalizadas e introducidas de la región de Magallanes, asociadas a la actividad silvoagropecuaria y áreas protegidas: atributos de vida, distribución y estatus de invasión. *Chloris Chilensis*, 24(2): 21-47. URL: . [ ]
- Domínguez, E. (2023). Dinámica de la cubierta vegetal en pastizales nativos de la estepa Magallánica perturbados por la construcción de un ducto de hidrocarburo, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 51, 1-16.
- Domínguez, E., & Santis, P. (2021). Plantas naturalizadas e introducidas de la región de Magallanes, asociadas a la actividad silvoagropecuaria y áreas protegidas: atributos de vida, distribución y estatus de invasión. *Chloris Chilensis*, 24 (2): 21-47. URL: <http://www.chlorischile.cl>.
- Elsinger, M.E., Dhar, A., & Naeth, M.A. (2022). Recovery of plains rough fescue grass- lands on reclaimed well sites. *Journal for Nature Conservation*, 66: 126122. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126122>
- Ferrante, D., Álvarez Bento, J., Vivar Miranda, M. E., Oliva G. E. y Utrilla V. R. (2023). Restauración por recolonización de especies nativas en pasturas sembradas en ambientes semiáridos en Patagonia. *Semiárida*, 33(1), 17-27.
- Hammer, Ø., Harper, D., & Ryan, P. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 (1): 1-9.
- Harper, K. A., & Kershaw, G. P. (1997). Soil characteristics of 48-yearold borrow pits and vehicle tracks in shrub tundra along the CANOL No. 1 Pipeline Corridor, Northwest Territories, Canada. *Arctic and Research*, 29(1), 105-111. <https://doi.org/10.2307/1551840>
- Hirsch, P. R., Jhurreea, D., Williams, J. K., Murray, P. J., Scott, T., Misselbrook, T. H., ... & Clark, I. M. (2017). Soil resilience and recovery: rapid community responses to management changes. *Plant and Soil*, 412(1), 283-297.
- Jost, L. (2018). What do we mean by diversity? The path towards quantification. *Métode Science Studies Journal*, 9: 55-61.
- Kowaljow, E., & Rostagno, C. M. (2013). Enramado y riego como alternativas de rehabilitación de regiones semiáridas afectadas por el tendido de ductos. *Ecología Austral*, 23(1), 62-69.
- Liu, Z., & Zhang, X. (2010). Steppe degradation and rehabilitation in northern China. In *Desertification and its control in China* (pp. 299-350). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). <https://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1524-pisos-vegetacionales-luebert-pliscoff-2017>
- Ma, W., Tang, S., Dengzeng, Z., Zhang, D., Zhang, T., & Ma, X. (2022). Root exudates contribute to belowground ecosystem hotspots: A review. *Frontiers in Microbiology*, 13, 937940. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.937940>
- Moore, D. M., & Goodall, R. N. P. (1977). La flora adventicia de Tierra del Fuego. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 8, 263-274.
- Naeth, M.A., Wilkinson, S.R., Locky, D.A., Bryks, C.L., Low, C.H., & Nannt, M.R. (2020). Pipeline Impacts and Recovery of Dry Mixed-Grass Prairie Soil and Plant Communities. *Rangeland Ecology & Management*, 73 (5): 619-628.
- Neilsen, D., MacKenzie, A.F. & Stewart, A. (1990). The effects of buried pipeline installation and fertilizer treatments on corn productivity on three eastern Canadian soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 70 (2): 169-179. <https://doi.org/10.4141/cjss90-019>
- Ordóñez, I., Radic-Schilling, S., Ivelic-Sáez, J., Muñoz-Arriagada, R., Pinochet, D., Covacevich, N., Valle, S., Tapia, A., Oyaneder, P., Valenzuela, J., Castro, A., & Navarro, M. (2023). Descripción de la vegetación, suelo y tasas de crecimiento de vegas y coironales en la Región de Magallanes. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Boletín No 486*, 100 pp. Punta Arenas, Chile.
- Perez-Quezada, J. F., Moncada, M., Barrales, P., Urrutia-Jalabert, R., Pfeiffer, M., Herrera, A. F., & Sagardía, R. (2023). How much carbon is stored in the terrestrial ecosystems of the Chilean Patagonia?. *Austral Ecology*, 48(5), 893-903.
- Pfeiffer, M., Padarian, J., Osorio, R., Bustamante, N., Olmedo, G. F., Guevara, M., ... & Zagal, E. (2020). CHLSOC: the Chilean Soil Organic Carbon database, a multi-institutional collaborative effort. *Earth System Science Data*, 12(1), 457-468.
- Pisano, E. (1977). *Fitogeografía de Fuego-Patagonia Chilena. I. Comunidades vegetales entre las latitudes 52°S y 56°S*. *Anales del Instituto de la Patagonia*, Punta Arenas Chile, 8: 121-250.
- Prach, K., & Pyšek, P. (2001). Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe. *Ecological Engineering*, 17(1), 55–62. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00132-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00132-4)

- Radic-Schilling, S., Corti, P., Muñoz-Arriagada, R., Butorovic, N., & Sánchez-Jardón, L. (2021). Ecosistemas de estepa en la Patagonia chilena: Distribución, clima, biodiversidad y amenazas para su manejo sostenible (pp. 223-255). En: C.C., Castilla, J.J., Armesto, & M.J., Martínez-Harms, (Eds), Conservación en la Patagonia chilena: Evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos. Ediciones Universidad Católica.
- Ren, S., Cao, Y., & Li, J. (2023). Nitrogen availability constrains grassland plant diversity in response to grazing. *Science of The Total Environment*, 896, 165273.
- Rodríguez, R., & Marticorena, A. (Eds.). (2019). Catálogo de las plantas vasculares de Chile. Universidad de Concepción.
- Santibáñez, F., Santibáñez, P., Caroca, C., & González, P. (2017). Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo VI: Regiones de Aysén y Magallanes.
- Shi, P., Xiao, J., Wang, Y.-F., & Chen, L. D. (2014). The effects of pipeline construction disturbance on soil properties and restoration cycle. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(3), 1825–1835.
- Soon, Y. K., Rice, W. A., Arshad, M. A., & Mills, P. (2000). Effect of pipeline installation on crop yield and some biological properties of boreal soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(3), 483–488.
- Soulodre, E.M.J., Dhar, A., & Naeth, M.A. (2022). Plant community development trends on mixed grass prairie well sites 5 years after reclamation. *Ecological Engineering*, 179,106635 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106635>
- Tekeste, M. Z., Hanna, H.M., Neideigh, E. R., & Guillemette, A. (2019). Pipeline right-of-way construction activities impact on deep soil compaction. *Soil Use and Management*, 35(2), 293–302.
- ter Braak, C.J.F. (1995). Ordination. In: R.H.G., Jongman, C.J.F., ter Braak, & O.F.R., van Tongeren, (Eds.), *Data Analysis in Community and Landscape Ecology* (pp. 91-173). Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511525575.007>
- Van Bemmelen, J. M. (1890). Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans usw im Ackerboden. Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen, 37(279), e290.
- Walck, J. L., Hidayati, S. N., Dixon, K. W., Thompson, K. E. N., & Poschlod, P. (2011). Climate change and plant regeneration from seed. *Global change biology*, 17(6), 2145–2161.
- Xiao, J., Wang, Y.-F., Shi, P., Yang, L., & Chen, L.-D. (2014). Potential effects of large linear pipeline construction on soil and vegetation in ecologically fragile regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(11), 8037–8048.
- Xu, C., Xu, X., Ju, C., Chen, H. Y., Wilsey, B. J., Luo, Y., & Fan, W. (2021). Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide. *Global Change Biology*, 27(6), 1170-1180.
- Zhao, F., Wang, N., Liu, J., & Zhou, Z. (2022). Effects of vegetation type and topography on vegetation restoration after pipeline construction in the Northern Shaanxi Loess Plateau, China. *Ecological Research*, 38(1): 177-187.
- Zuloaga, F., Morrone, O., & Belgrano, M. (2020). Catálogo de las Plantas Vasculares del Cono Sur. Versión base de datos en sitio web del Instituto Darwinion, Argentina. URL: <http://www.darwin.edu.ar/Proyectos/FloraArgentina/FA.asp>. julio 8, 2025.

Letra afiliación	Nombre de la institución y/u organización
1	Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile
2	Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile
3	Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile

Autor	Afiliación
Erwin Domínguez	1
Milenka Seguich	2
Sebastián Pérez	3
Gerardo Moreno	4