



ESTIMACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LAS RESERVAS DE CARBONO EDÁFICO EN MALLINES DE PATAGONIA NORTE

Enriquez, A.S.^{1,*}, F. Umaña² & J.J. Gaitán³

¹ Instituto Forestal Agropecuario Bariloche (INTA-CONICET); ² INTA EEA Bariloche; ³ Instituto de Suelos INTA Castelar, CONICET, Universidad Nacional de Luján

* Modesta Victoria 4450, (CP: 8400), Bariloche, Río Negro. enriquez.andrea@inta.gov.ar

RESUMEN: El monitoreo y la presentación de informes sobre carbono orgánico del suelo (COS) y otros servicios ecosistémicos está adquiriendo relevancia para cumplir con convenios y mecanismos internacionales. Específicamente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentino está propulsando la generación de cartografía y monitoreo de humedales y el INTA ha generado proyectos nacionales que acompañan ese fin (2019-PD-E2-I506-002: Humedales de la Argentina; 2019-PD-E3-I062-001: estrategias de secuestro de carbono y mitigación del Cambio Climático; 2019-PE-E2-I040-002: monitoreo de la degradación de tierras). Nuestro proyecto busca contribuir con los anteriores objetivos nacionales generando además información regional y de sus proyecciones en función de forzantes como el uso de la tierra o el clima, que habiliten la generación de propuestas de planes de conservación, restauración, uso de las tierras y monitoreo para los ecosistemas abordados. En esta oportunidad presentamos un avance de la cartografía de mallines de Patagonia Norte, como humedales continentales de tipo semipermanente con relevancia para la región. Con esta información, realizamos una primera estimación de la reserva de COS en mallines (a 0-30 cm y a 0-100 cm), como línea para mejorar la precisión en los datos presentados en el Mapa de COS de la República Argentina (tomados por FAO para el mapa global de COS) para esa región, sin considerar humedales. Los resultados parciales muestran una ocupación media de mallines del 0,9% de la superficie de Patagonia Norte que, según el modelo generado para estimar el COS en mallines, incrementaría entre el 1,2% (a 0-30 cm) y el 4,2% (a 0-100 cm) la reserva de COS reportada por el Mapa Nacional para la región. La reserva total de COS estimada para mallines equivale por ejemplo al 61 % de las emisiones anuales del país y brinda apoyo en la búsqueda de sustentabilidad de la actividad ganadera de la región.

PALABRAS CLAVE: mapa mallines, estimación-validación-calibración, reservorio de carbono en suelo.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las recomendaciones realizadas en el Simposio Internacional sobre el carbono orgánico del suelo (GSOC, 2017) bajo el lema "Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo", el TEMA 1 tratado fue medición, mapeo, monitoreo, informe y verificación sobre las reservas del COS y sus cambios. Las recomendaciones fueron tendientes a organizar las capacidades de los países para medir y monitorear las reservas de COS, priorizando aquellos que aun utilizan las tablas de referencia Tier 1 del IPCC para establecer las reservas del COS y los factores de cambio. En el caso de la República Argentina, en los últimos años un grupo liderado por investigadores de INTA ha iniciado la tarea de generar un sistema de bases de datos, desarrollado específicamente para almacenar información de suelos del país (Red SISINTA, <http://sisinta.inta.gov.ar/>), que se ha nutrido de la información aportada por investigadores del territorio nacional. Para el caso de la Patagonia Norte, la red MARAS (<https://maras.inta.gov.ar/portal/app/index.php>) ha aportado datos de COS de ecosistemas de estepa para la elaboración del mapa de COS de la República Argentina (Olmedo et al., en revisión) (en adelante Mapa Nacional), el cual fue incorporado al mapa global de COS

Organizado por:

1397



elaborado por FAO y el Panel Técnico Intergubernamental sobre Suelos (PTIS) en 2018, (<http://54.229.242.119/GSOCmap/>). El mapa mundial es un avance sumamente importante en la búsqueda de reducir el desconocimiento de las reservas de carbono en las diferentes regiones del planeta, pero aún tiene limitaciones relacionadas a la variabilidad y precisión de los datos. Específicamente, para Patagonia Norte (compuesta casi por la totalidad de las provincias de Río Negro y Neuquén) el Mapa Nacional de COS no contempla a todos los humedales, especialmente a los de tipo “mallín” de las zonas áridas y semiáridas, hecho que constituiría una subestimación en las reservas de COS en esa porción del territorio. El objetivo de este trabajo es avanzar en la mejora de la precisión del dato de la reserva de COS para Patagonia Norte, mediante la generación de un primer mapa integrado de humedales con capa de COS asociada, a 30 cm y 1 m de profundidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El alcance de este proyecto es Patagonia Norte. El área presenta un gradiente de precipitaciones en sentido oeste-este (2.500-150 mm año⁻¹) y otro de temperaturas medias anuales (4-16°C) asociado con la altimetría. El clima, junto a los diferentes tipos de suelos y sistemas de drenaje (Bran et al., 2000; Godagnone y Bran, 2006; Chimner et al., 2011; Gaitán et al, 2019), determinan siete áreas ecológicas (Fig. 1A). Allí, puede encontrarse una variedad de biomas (de oeste a este: bosque, ecotono, matorral, estepa gramínea arbustiva, monte y valles). Específicamente, el gradiente de precipitación es acompañado por una marcada reducción de la superficie ocupada por mallines en el mismo sentido (López et al., 2005).

Cartografía de mallines Patagonia Norte

Etapa 1) Generación de un sistema de información geográfico y desarrollo de una base de datos con atributos de relevancia asociada; recopilación, normalización y georreferenciación de datos preexistentes (propios y bibliográficos) de sitios con presencia de mallines.

Etapa 2) Colección de cartografía e información de trabajos preexistentes (Bran et al., 1997, 1998; Gaitán et al., 2015ayb), verificadas sobre imágenes Landsat: control, ajuste y generación de capa de información.

Estimación de la reserva de Carbono Orgánico del Suelo

La iniciativa “Degradación Neutral de las Tierras” de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, a la cual el país adhiere, propone el monitoreo de las reservas de COS hasta los 30 cm de profundidad, por lo que la estimación del mapa de reserva de COS para mallines se realizó a esa profundidad. No obstante, los países pueden medir el COS y sus cambios para capas más profundas de suelo. Dadas las características de los suelos de mallines como humedales, se realizó también el cálculo de la reserva de COS hasta el metro de profundidad.

Estimación del contenido de COS (%) a nivel regional (0-20 cm y 0-100 cm)

Se utilizaron 160 sitios de mallín localizados en las provincias de Río Negro y Neuquén (Fig.1D) con datos de porcentaje de COS (%COS) (Walkley y Black) a 0-20 cm de profundidad. Desde esos sitios se extrajo información para evaluar su posible uso como variables predictoras del %COS:

Precipitación media anual (PPT). Fuente: Atlas climático digital INTA. Resolución espacial: 1 km

Evapotranspiración potencial (ETP). Fuente: Atlas climático digital INTA. Resolución espacial: 1 km Temperatura mínima, máxima y media (Tmin, Tmax, Tmedia) : Fuente: producto MOD11A2. Periodo: media 1/1/2001 al 31/12/2019. Resolución espacial: 1 km.

Radiación solar (RAD). Fuente: Worldclim. Resolución espacial: 1 km.

Índice Aridez (IA): PPT/ETP

Reflectancia superficial de las bandas 3, 4, 5, 6 y 7 e índices NDVI y EVI. Fuente: Landsat 8. Media del periodo 1/1/2014 al 31/21/2017. Resolución espacial: 30 metros

Mediante análisis de regresión lineal múltiple se identificaron las variables que mejor explican la variabilidad espacial del %COS de mallines a 0-20 cm de profundidad. Tres variables

independientes explicaron en conjunto el 50.4% de la variación del %COS de mallines a 0-20 cm, $p < 0,05$. El modelo ajustado ($R^2_{aju} = 0,504$; $F = 54,09$) en Ecuación 1.

Ecuación 1. $\%COS_{0-20cm} = (-0,0045406 * RAD) - (0,00128263 * B6) + (0,00516517 * PPT) + 75,4803$

Donde *RAD* es radiación solar, *B6* es la reflectancia superficial en banda 6 y *PPT* es precipitación media anual.

Cálculo de la reserva de COS (t ha⁻¹) a nivel regional (0-30 cm y 0-100 cm)

A los efectos de modelar la reserva de COS (t ha⁻¹) hasta 100 cm de profundidad, se utilizó un subconjunto de 22 sitios con datos de la variación de %COS y de densidad aparente (DAP) hasta el metro de profundidad, generando dos modelos (Ecuación 2 y 3).

Ecuación 2. $\%COS_{0-100cm} = [-32,02 * Ln(x)] + 180,15$; donde *x* es profundidad (cm); $R^2=0,8047$.

Ecuación 3. $DAP_{0-100cm} = 0,0074(x) + 0,8339$; donde *x* es profundidad (cm); $R^2=0,5665$.

Utilizando las ecuaciones 2 y 3, se estimó el valor medio de variación del %COS (relativo a la capa 0-20 cm) y de DAP, en cinco capas de 20 cm de espesor, hasta los 100 cm de profundidad (Tabla 1). Con estos datos, y utilizando la ecuación 4, se estimó la reserva de COS (t ha⁻¹) de cada una de las cinco capas de suelo. Las estimaciones de reserva de COS de estas capas fueron agregadas para obtener los mapas de reserva de COS a 0-30 cm y a 0-100 cm de profundidad.

Tabla 1. Factor de decaimiento del contenido de COS en diferentes capas del perfil del suelo, expresado en relación al %COS a 0-20 cm ($FD_{capaX} = \%COS_{capaX} / \%COS_{0-20cm}$). Variación de la densidad aparente (DAP) en el perfil.

Capa de suelo (cm)	Factor Decaimiento (FD) COS	DAP (t m ⁻³)
0-20	1,000	0,908
20-40	0,644	1,056
40-60	0,471	1,204
60-80	0,356	1,352
80-100	0,271	1,500

Ecuación 4. $ReservaCOS_{capaX} = COS_{0-20cm} * FD_{capaX} * DAP * p_{capaX}$

Donde, *ReservaCOS_{capaX}* se expresa en t m⁻², el contenido de carbono *COS* en g g⁻¹, la densidad aparente *DAP* en t m⁻³ y la profundidad de la *capaX* $p = 0,2$ m. Para transformar las unidades de stock de t m⁻² a ton ha⁻¹, se multiplica por el factor 10⁴ m² ha⁻¹.

Los resultados de la reserva de COS estimada a 0-30 y 0-100 cm de profundidad para suelos de mallín de Patagonia Norte fueron comparados con los informados en el Mapa Nacional de COS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cartografía Mallines Patagonia Norte

El mapa de mallines de Patagonia Norte generado a partir de la compilación de información de base verificada sobre imágenes Landsat es un avance de la cartografía que existe hasta la fecha. No obstante, los sitios georreferenciados con presencia de mallín (Fig. 1B) ponen de manifiesto la necesidad de realizar la etapa de relevamiento y validación a campo para mejorar la representación y la precisión regional de esta cartografía. La superficie de mallines cartografiados a la fecha es de 230.774 has (Tabla 2; Fig. 1C). La media ponderada arroja una ocupación del 0,9% de la región de Patagonia Norte. Excluyendo del análisis al Monte

Austral (por la subrepresentación de mallines real y relevada) y al Monte Oriental y Grandes Valles Irrigados (por ausencia de mallines), la representación asciende al 1,8% (Fig. 1C). La validación debería reforzarse, especialmente en la región de Cordillera y la región Centro-Este de Sierras y Mesetas Occidentales y Distrito Central Patagónico.

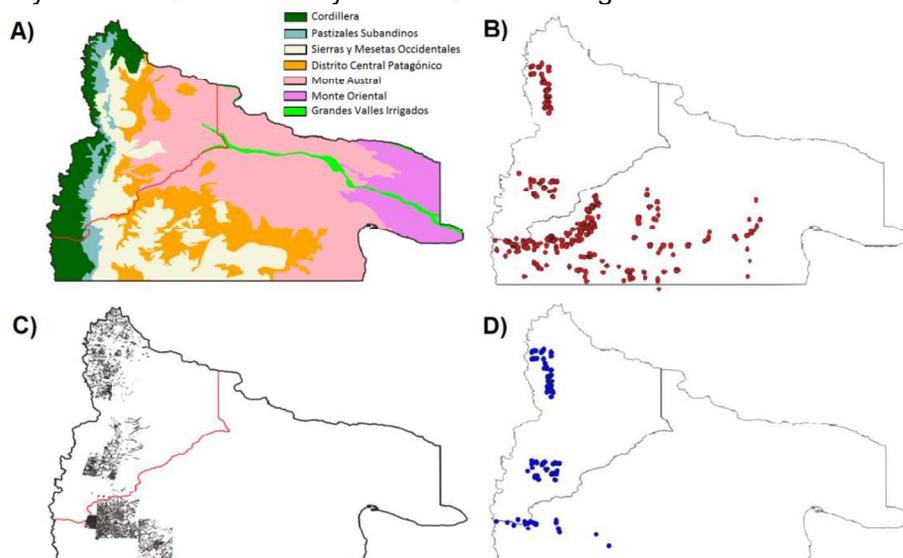


Figura 1. Territorio de Patagonia Norte: A) Áreas ecológicas (Bran et al., 2000, actualizado al 2019). B) Sitios de mallín georreferenciados en bibliografía (propia y recopilada); C) Cartografía de mallines; D) Ubicación de los 160 sitios utilizados para la generación del modelo de %COS en mallín.

Tabla 2. Porcentaje de mallines ponderado por Área Ecológica (AE), por superficie de la región de Patagonia Norte con presencia significativa de mallines (PNM) y por la totalidad de la región (PN).

Área Ecológica	Superficie AE (ha)	Superficie mallín (ha)	% mallín / AE	% mallín / PNM	% mallín / PN
Cordillera	2.903.978	26.789	0,9	0,21	0,10
Pastizales Subandinos	1.232.198	70.268	5,7	0,56	0,27
Sierras y Mesetas Occid.	5.593.347	105.089	1,9	0,84	0,40
Distrito Central Patagónico	4.989.593	22.130	0,4	0,18	0,08
Monte Austral	11.523.982	6.499	0,06	nc	0,02
Monte Oriental	1.629.556	0,0	0,0	nc	0,00
Grandes Valles Irrigados	539.940	0,0	0,0	nc	0,00
Total regional	26.243.097	230.774		1,79	0,87

nc: no contemplado en el análisis.

Mapa COS de mallines Patagonia Norte

Con la información generada, se elaboró un mapa de reserva de COS para los suelos de mallines de Patagonia Norte (Fig. 2). La reserva promedio de COS fue estimada en 116,81 t ha⁻¹ para 0-30 cm (Fig. 2A) y en 264,13 t ha⁻¹ para 0-100 cm (Fig. 2B). El Mapa Nacional informa un promedio de 38,42 t ha⁻¹, considerando todos los tipos de suelos presentes en Patagonia Norte (Río Negro y Neuquén). Si se toma exclusivamente el área de mallines, el Mapa Nacional reporta una media de 53,79 t ha⁻¹ (0-30 cm).

Considerando las 230.774 has de mallín mapeadas y la superficie de Patagonia Norte, se pudieron estimar las reservas de COS regionales, para cada caso (Tabla 3). El no contemplar la existencia de los mallines representaría una subestimación en la reserva promedio del área con mallines de dos a casi cinco veces, a 0-30 cm y 0-100 cm de profundidad,

respectivamente. En consecuencia, la reserva media de COS regional también estaría subestimada por el Mapa Nacional (Tabla 3).

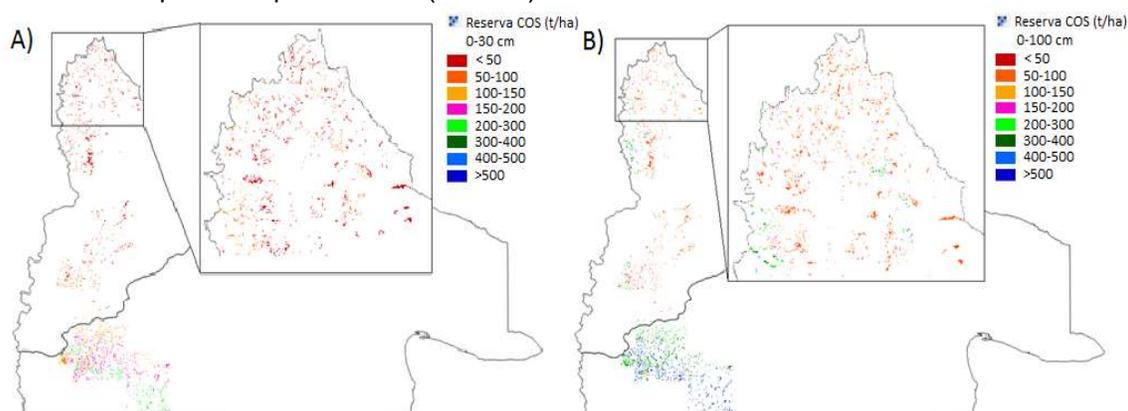


Figura 2. Mapas de reserva de carbono orgánico del suelo (COS) para mallines de Patagonia Norte, sobre base de cartografía de mallines (Fig. 1C): A) Reserva a 0-30 cm y B) Reserva a 0-100 cm.

Tabla 3. Reserva de COS estimada para el área de mallines relevados y para la región de Patagonia Norte (PN), utilizando los datos de este trabajo (Modelo Mallín: MM) y del Mapa Nacional (MN). Δ : porcentaje de incremento de COS entre MM y bibliografía.

Área (ha)	Profundidad	MM (Gg)	MN (Gg)	Δ MM/MN
Mallines 230.774	0-30 cm	26.957	12.413	117%
	0-100 cm	60.750	-	389%
PN 26.243.097	0-30 cm	1.020.857	1.008.260	1,2%
	0-100 cm	1.050.511	-	4,2%

1 Gigagramo (Gg)= 1000 Toneladas (t) = 1000 Megagramos (Mg)

La media de COS (0-20 cm) en los 160 sitios de mallines evaluados en este estudio fue de 5,3%, mientras que para suelos de estepa (0-10 cm), Gaitán et al (2019) reportaron una media de 0,57% en función de 63 sitios de la misma región (relación media COS mallín-estepa ~9:1). Sin embargo, observamos que el valor medio de la reserva de COS ($t\ ha^{-1}$) a 0-30 cm es dos veces mayor en mallines que en estepa (Mapa Nacional a 0-30 cm). Es probable que el factor densidad aparente ($0,98\ t\ m^{-3}$ en mallín vs. $1,3\ t\ m^{-3}$ en estepa, a 0-20 cm) asociado a mayor contenido de MOS y a una granulometría más fina en suelos de mallín respecto de estepa, haga que finalmente los cálculos que contemplan masa deriven en estos resultados. Por otro lado, si consideramos los valores antes mencionados (considerando %COS y DAP con variación constante hasta 30 cm), la reserva en estepa debería rondar las $22,2\ t\ ha^{-1}$, no obstante el Mapa Nacional reporta una media de $53,79\ t\ ha^{-1}$. El modelo utilizado por el Mapa Nacional fue ajustado con datos nacionales donde Patagonia está subrepresentada, utilizando algunos datos de estepa y en su mayoría datos de región pampeana; esta influencia poco equitativa de datos en el territorio parece sobrestimar los valores para la Patagonia, sobre todo si se considera que no han contemplado la existencia del carbono en el suelo de mallines. Estas subestimaciones se trasladan al mapa mundial de COS, presentado por FAO en 2018. Si se contempla el factor profundidad, la brecha entre este trabajo y la bibliografía se agranda (la subestimación en la reserva del COS pasa del 1,2% al 4,2%). La estepa no desarrolla suelos profundos, y los mallines sí lo hacen, incluso llegando a perfiles más profundos de 1 m. Considerando que los mallines cartografiados a la fecha solo ocupan el 0,9% del territorio, su presencia se hace más relevante en función de los servicios ecosistémicos de provisión, soporte y regulación que ofrecen a la región rural.

Finalmente, la reserva total COS en mallines a 0-100 cm de profundidad equivale a 222.800 Gg CO_2 equivalente [$60.750 \times (44,01/12)$]. El carbono almacenado en suelos de mallín de Patagonia Norte se corresponde con el 61% de las emisiones anuales del país (INVGEI

Nacional, 2019) o bien equivale a 265 veces las emisiones anuales de metano por fermentación entérica reportadas para la Provincia de Río Negro (INVGEI Provincial 2019, en revisión).

CONCLUSIONES

Mantener las reservas de COS en equilibrio o aumentar los contenidos de COS hacia un nivel óptimo para el medio ambiente puede contribuir de maneras diversas con los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS, ONU). Este trabajo presenta una primera aproximación de la cartografía de mallines, lo que indica una distribución desigual en el territorio y la necesidad de verificaciones a campo. Esto, sumado al desarrollo de un modelo múltiple regional para la estimación de COS en mallines, permitió generar una primera cartografía de la reserva de COS. Los resultados señalan que el mapa Nacional de COS y, por lo tanto el mapa global de reservas de COS de FAO, subestiman las reservas de los suelos del norte de la Patagonia al no contemplar la presencia de mallines. Dicha subestimación asciende hasta un 4% cuando se incluyen las reservas de COS en los mallines (0-100 cm) enfatizando que éstos, en promedio, ocuparían el 0,9% del territorio. Estos resultados aumentan el valor de los pastizales naturales de la región como sumideros de carbono, compensando los efectos de las emisiones atribuidas a la actividad ganadera. Presentamos la primera instancia de un proyecto regional, que continúa para mejorar la precisión del mapa de mallines, del servicio ecosistémico de COS y otros, y el monitoreo de la trayectoria de cambio de estos ambientes en el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de Suelos y Aguas de INTA EEA Bariloche, por análisis de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Bran, D; Ayesa, J & López, C. 2000. Actualización 2019. Áreas ecológicas de Río Negro, Laboratorio de teledetección-SIG, INTA-EEA Bariloche. Última actualización: 2019.
- Bran, DC; C López; A Marcolín; J Ayesa & D Barrios. 1997. Cartografía utilitaria de Vales y Mallines a partir de información satelital del Área de Ingeniero Jacobacci, Provincia de Río Negro, Argentina.
- Bran DC, C López, A Marcolín, J Ayesa, D Barrios. 1998. Valles y Mallines de la comarca de Ingeniero Jacobacci (Río Negro). Distribución y tipificación utilitaria. Ed. INTA.
- Chimner, RA; GL Bonvissuto; MV Cremona; JJ Gaitán & CR López. 2011. Ecohydrological conditions of wetlands along a precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Ecología Austral* 21:329-337.
- FAO & PTIS. 2018. Global Soil Organic Map (GSOCmap) Technical, Report, Rome, Italy.
- Gaitán, JJ; FT Maestre; DE Bran; GG Buono; AJ Dougill; GG Martinez;..., & AD Thomas. 2019. Biotic and Abiotic Drivers of Topsoil Organic Carbon Concentration in Drylands Have Similar Effects at Regional and Global Scales. *Ecosystems*, 22:1445-1456.
- Gaitán, JJ; DE Bran; GE Oliva & PA Stressors. 2019. *Patagonian Desert*. Elsevier.
- Gaitán, JJ; D Bran; F Raffo; J Ayesa & F Umaña. 2015a. Evaluación y cartografía de mallines de la zona de Junín de los Andes, provincia del Neuquén.
- Gaitán, JJ; D Bran; F Raffo; J Ayesa & F Umaña. 2015 b. Evaluación y cartografía de mallines de la zona de Loncopué y Chos Malal, provincia del Neuquén. Comunicación técnica, (131).
- Godagnone, RE & D Bran. 2006. Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro. Actualización.
- GSOC. 2017. Simposio Internacional sobre el carbono orgánico del suelo. Liberación del potencial del carbono orgánico del suelo. Documento de resultados. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 21-23 marzo, Sede de la FAO-Roma, Italia.
- INVGEI. 2019. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación. Argentina. 44pp.
- López, C; JJ Gaitán; J Ayesa; G Siffredi & D Bran. 2005. Comunicación técnica N°97, Área de Recursos Naturales. Relevamiento Integrado, evaluación y clasificación de valles y mallines. Del Sudeste de Río Negro (Informe final Proyecto PAN 2003-2004).