



**Universidad de Concepción**  
**Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas**  
**Biología**

**INFLUENCIA DE LOS NUTRIENTES DERIVADOS DE**  
**AVES MARINAS SOBRE EL CONTENIDO DE**  
**NITRÓGENO EN MUSGOS ANTÁRTICOS**

Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Biólogo.

**POR: CRISTÓBAL FRANCISCO ARANEDA OLIVARES**

**Profesor Guía: María Angélica Casanova Katny**

**Director de Tesis: Göetz Palfner**

Mayo 2020  
Concepción, Chile

## DECLARACIÓN

**Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica de este documento.**



## AGRADECIMIENTOS

Luego de más de un año de trabajo, con un intenso e inolvidable trabajo en terreno, el cual fue sucedido por un mucho más tranquilo trabajo de laboratorio, la primera persona a la cual debo agradecer por toda la experiencia que realizar este trabajo significó para mí, es a mi profesora guía, la Dra. Angélica Casanova-Katny, quien confió en mí desde un principio y me brindó oportunidades que ni siquiera habría imaginado, como lo fue desarrollar una investigación sobre la vegetación antártica. A ella agradezco también las horas de conversaciones, consejos, guías, y correcciones, que me permitieron llevar el trabajo sin mucha pérdida en el camino, y que finalmente en conjunto a las horas de traspasadas frente a la pantalla (por procrastinador o por simple costumbre) leyendo publicaciones y redactando ideas, culminan en el trabajo aquí presente (o quizás no necesariamente aquí). Agradezco enormemente las correcciones oportunas, la inmensa disponibilidad, y la gran dedicación con la que la profesora Angélica se hizo presente durante estos meses, guiándome en el camino.

Así mismo, agradezco al profesor Saldaña y al Dr. Óscar Toro, quienes no dudaron en brindarme consejos y sugerencias, las cuales espero haber interiorizado correctamente.

Al profesor Goetz Palfner, por recibirme en su laboratorio y su inmensa buena disposición respecto a mi trabajo en general.

Volviendo un poco más atrás, y aunque dudo que estas palabras lleguen a ellos, quiero agradecer a toda la dotación de la XXXII Campaña Antártica del e.t. de la Base Española Gabriel de Castilla (verano 2018-2019). No olvidaré todo el apoyo y la simpatía que recibí durante mi estancia en dicha base.

He de agradecer también a todas las personas que me acompañaron durante mi formación universitaria, y que me brindaron apoyo, consejo, y una grata compañía. Entre ellos destaco aquellos con quienes más tiempo pasé disfrutando, conversando, realizando trabajos, y discutiendo acerca de éstos: Jesús, Lepe, Catita, Nico, Seba, Gabriel, Cami, y Pablo. Gracias a ustedes por todas las vivencias desde el inicio de la carrera hasta la finalización de esta tesis.

Finalmente, agradecer al proyecto FONDECYT N°1181745 por el financiamiento de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN .....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
1. RESUMEN .....	10
2. ABTSRACT .....	12
3. INTRODUCCIÓN .....	14
4. OBJETIVOS.....	23
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	23
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
5. METODOLOGÍA .....	24
5.1. SITIO DE TRABAJO .....	24
5.2. DISTRIBUCIÓN DE COMUNIDADES DE MUSGOS EN EL TRANSECTO HASTA LA PINGÜINERA.....	26
5.3. TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE CARBONO/NITRÓGENO.....	27
5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	28

<b>6. RESULTADOS</b> .....	29
<b>6.1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y LA VEGETACIÓN</b> .....	29
<b>6.2. MAPEO DE LA VEGETACIÓN</b> .....	35
<b>6.3. CONTENIDO DE NITRÓGENO EN LAS MUESTRAS FOLIARES Y DE SUELO</b> .....	36
<b>6.4. VALORES DE LA FIRMA DE <math>\Delta^{15}\text{N}</math> EN MUSGOS Y SUELOS</b> .....	39
<b>6.5. CONTENIDO DE C EN PORCENTAJE EN LAS MUESTRAS DE MUSGOS Y SUELOS</b> 41	
<b>6.6. VALORES DE LA FIRMA DE <math>\Delta^{13}\text{C}</math> EN MUSGOS Y SUELOS</b> .....	42
<b>6.7. COEFICIENTE DE C/N EN MUSGOS Y SUELOS</b> .....	44
<b>6.8. COMPARACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO Y NITRÓGENO ENTRE ESPECIES DE MUSGOS</b> .....	46
<b>6.9. CORRELACIÓN ESPECIE ESPECÍFICA ENTRE EL CONTENIDO DE NUTRIENTES ENCONTRADO EN LAS MUESTRAS VEGETALES Y SUS SUELOS ASOCIADOS</b> .....	48
<b>7. DISCUSIÓN</b> .....	51
<b>7.1. VEGETACIÓN EN ISLA DECEPCIÓN</b> .....	51
<b>7.2. EFECTO Y ALCANCE DEL NITRÓGENO APORTADO POR LA PINGÜINERA</b> .....	53
<b>7.3. DIFERENCIAS ESPECIE-ESPECÍFICAS</b> .....	57
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	62
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ubicación de la Isla Decepción en el Archipiélago de las Shetland del Sur, en la Península Antártica .....	24
<b>Figura 2:</b> Imagen obtenida de Google Earth representativa de cada sector de muestreo en el transecto .....	33
<b>Figura 3:</b> Mapeo de la vegetación observada en el transecto de trabajo. Las flechas indican el código de cada sitio de muestreo .....	36
<b>Figura 4:</b> Contenido promedio de nitrógeno (en porcentaje) en musgos (A, n= 87 ± DS) y en suelos (B, n= 57 ± DS) según sector de muestreo .....	38
<b>Figura 5:</b> Gráfico de cajas para el contenido de nitrógeno (en porcentaje) en cada sitio de muestreo para musgos (A, n= 87 ± DS) y suelos (B, n= 57 ± DS) .....	39
<b>Figura 6:</b> Valor promedio de la firma de $\delta^{15}\text{N}$ en las muestras de musgos (A, n= 87 ± DS) y suelos (B, n=56 ± DS). .....	40
<b>Figura 7:</b> Contenido promedio de carbono (en porcentaje) contenido en muestras de musgos (A, n= 87 ± DS) y suelos (B, n=60 ± DS) .....	41
<b>Figura 8:</b> Valor promedio de la firma de $\delta^{13}\text{C}$ en musgos (A, n= 87 ± DS) y en suelos (B, n= 60 ± DS) agrupadas según sector .....	43

**Figura 9:** Valor promedio del cociente de C/N en muestras de musgos (A,  $n=87 \pm DS$ ) y suelos (B,  $n= 57 \pm DS$ ) ..... 45

**Figura 10:** Gráfico de puntos entre el contenido foliar de y en el suelo de carbono (A,  $n= 34$ ; Pearson  $r= 0,01$   $p= 0,938$ ) y de nitrógeno (B,  $n=34$ ; Pearson  $r= 0,4$   $p=0,020$ ) ..... 49



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Lista de especies encontradas en el área de trabajo .....	29
<b>Tabla 2:</b> Área de extensión de los sitios de muestreos y de la vegetación asociada a estos .....	33
<b>Tabla 3:</b> Lista de especies de musgos registradas en el transecto y los sitios en las cuales fueron muestreadas .....	34
<b>Tabla 4:</b> Parámetros de C y N según especie .....	47
<b>Tabla 5:</b> Valores obtenidos para los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman entre los contenidos foliares y en suelo de C y N para cada especie . .....	50

## 1. RESUMEN

En la península Antártica, los ecosistemas terrestres están sustentados principalmente por la amplia presencia de briófitas, líquenes, y dos plantas vasculares. Destacan aquí los musgos, debido a su capacidad de crecer en extensas comunidades de hasta varios metros cuadrados. Estas plantas se ubican comúnmente en zonas libres de hielo y al alcance de la influencia animal. En este sentido, las pingüineras, que congregan fácilmente miles de pingüinos al año, bombean grandes cantidades de nutrientes en el ecosistema terrestre. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de este gran bombeo de nutrientes, y el alcance que estos poseen a través de análisis isotópicos de  $\delta^{15}\text{N}$  y contenido foliar de N. Además, se evaluó la relación especie específica entre el contenido de C foliar y el contenido de C en el sustrato del musgo, con el fin de determinar posibles diferencias en el rol que cumplen las especies en el ciclaje de nutrientes. Los resultados obtenidos muestran una alta influencia de la pingüinera sobre el contenido de N tanto en suelos como en musgos en los sitios colindantes, con un impacto que disminuye conforme aumenta la distancia. Aun así, dicho alcance no pudo ser determinado, y se sugiere que en zonas interiores de las islas, el aporte de N necesario para la supervivencia de los musgos depende de los individuos nidificantes de Skúas (*Stercorarius* spp.). En cuanto a los musgos, se detectaron algunas diferencias significativas en el contenido de C y N, así como en sus suelos asociados, aunque no existieron correlaciones significativas entre ambos contenidos. No fue posible determinar diferentes roles

en el ciclaje de nutrientes, aunque se sugiere que debido a la gran inequidad en abundancia, y en las variables características biológicas, estas diferencias podrían existir, aunque el extremadamente ralentizado proceso de descomposición causado por las bajas temperaturas podría volverlas despreciables.



## 2. ABSTRACT

In the Antarctic peninsula, terrestrial ecosystems are mainly supported by the wide presence of bryophytes, lichens, and two vascular plants. Due to its ability to grow in large communities of up to several square meters, mosses stand out among these. These plants are commonly located in ice-free areas and within the reach of animal influence. Accordingly, penguins, which easily congregate thousands of penguins a year, pump large amounts of nutrients into the terrestrial ecosystem. The objective of this work was to determine the effect of this large pumping of nutrients, and the distance they reach, through isotopic analyzes of  $\delta^{15}\text{N}$  and leaf content of N. In addition, the species-specific relationship between the content of leaf C was evaluated and the C content in the moss substrate, in order to determine possible differences in the role that species play in nutrient cycling. The results obtained show a high influence of the penguin colony on the N content both in soils and in mosses in the adjacent sites, with an impact that decreases as the distance increases. Even so, this range could not be determined, and it is suggested that in the interior areas of the islands, the contribution of N necessary for the survival of mosses depends on the nesting individuals of Skuas (*Stercorarius* spp.). Regarding the mosses, some significant differences were detected in the content of C and N, as well as in their associated soils, although there were no significant correlations between both contents. It was not possible to determine different roles in nutrient cycling, although it is suggested that due to the great inequality in abundance, and in the variable

biological characteristics, these differences could exist, although the extremely slowed down decomposition process caused by low temperatures could make them despicable.



### 3. INTRODUCCIÓN

El continente Antártico, el quinto de mayor extensión y más austral de todos, es un continente extremo, donde las condiciones son inhóspitas para la mayoría de las especies terrestres. En términos ecológicos, la región antártica es dividida en tres subregiones: Antártica continental, antártica oceánica, e islas subantárticas. Cada subregión posee sus propias características geográficas y climáticas que la delimita (precipitaciones, temperaturas medias anuales, extensión de zonas libres de hielo, horas de luz, etc.) y por lo tanto, existen diferentes condiciones que determinan la biodiversidad en cada zona (Beyer & Bölter 2002).

En cuanto a la Antártica marítima, la cual incluye gran parte de la Península Antártica y las islas colindantes en la zona oeste del continente (hasta los 69°S), se caracteriza por ser una zona ampliamente influenciada por el océano. En cuanto a sus condiciones climáticas, la temperatura media oscila entre -10 a +2 °C durante el año, con inviernos que rara vez alcanzan temperaturas menores a -15 °C. Las precipitaciones varían entre 20 a 100 cm, con cielos usualmente nublados (Beyer & Bölter 2002). Estas características permiten una mayor presencia de zonas libres de hielo en comparación a la Antártica continental.

Aun así, sobrevivir en este ambiente no es tarea fácil; por ejemplo, la flora de la Antártica está restringida a zonas costeras libres de hielo (Convey et al. 2014), siendo su distribución limitada principalmente por la disponibilidad local de hábitat no congelados y con agua disponible (Robinson et al. 2018 y citas incluidas ahí).

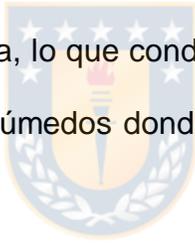
Es entonces que en estos “oasis” entre permanentes glaciares podemos encontrar concentrada la flora del continente, la cual consta de alrededor de 250 especies de líquenes, 100 musgos, 25 hepáticas, y 2 plantas vasculares en el caso de la Antártica marítima (Convey 2005), y que conforman el bioma de tundra polar antártica.

De estas especies vegetales, los musgos destacan en los ecosistemas terrestres del continente, siendo capaces de cubrir varios metros de extensión en las zonas más propicias, funcionando como hábitat y refugio para otras especies (Ej: Usher & Booth 1984; Casanova-Katny & Cavieres 2012, Prather et al. 2019).

Una de las características que les permite a los musgos soportar las extremas condiciones del continente, corresponde a la capacidad de suspender totalmente la actividad metabólica durante las épocas de invierno (Proctor 2000), caracterizadas por constantes temperaturas bajo cero y pocas horas de luz, lo que genera capas densas de nieve que cubren la vegetación, manteniéndola aislada del medio exterior (Ochyra et al. 2008). De esta forma, y exceptuando algunos casos (Collins 1973) los musgos se encuentran en estados de dormancia a la espera del verano austral, el cual dura alrededor de 12 semanas y es la época de mayor actividad fisiológica para estas especies.

Durante estos meses, las temperaturas atmosféricas suelen superar los 0°C durante el día, lo que causa un gran aumento de las temperaturas en los tapetes y cojines de musgos, que fácilmente superan los 20°C, pudiendo alcanzar o

superar incluso, al menos por cortos periodos de tiempo, 35 a 40 °C (Lewis 1988, Perera-Castro 2020). Esto genera una rápida deshidratación, debido a que los musgos y briófitas en general pierden o absorben agua de forma directa a través de la membrana celular (pues no tienen cutícula ni estomas en los filidios), regulando sus contenidos de agua intracelular en relación a la humedad del aire y de su entorno (Oliver et al. 2005). Si bien algunas especies son más tolerantes que otras a la desecación (Robinson et al. 2000, Zúñiga-González 2016), es esta imposibilidad de regular el agua intracelular, carecer de un sistema vascular desarrollado, y la ausencia de un sistema radicular capaz de absorber agua y nutrientes de manera efectiva, lo que condiciona a los musgos, en primer lugar, a establecerse en hábitats húmedos donde puedan obtener agua con facilidad (Wasley et al. 2006).



Además, los musgos requieren de nutrientes para poder realizar sus actividades metabólicas, siendo la disponibilidad de nitrógeno un factor limitante para el desarrollo de comunidades vegetales en algunas zonas (Wasley et al. 2006). En este sentido, los suelos de la Antártica son ampliamente considerados pobres con respecto a los nutrientes, a los espacios disponibles para la colonización de plantas y a los hábitats para organismos. Los suelos han sido descritos también como jóvenes, con escasa estratificación, alto contenido de restos óseos gruesos, y bajo contenido de materia orgánica (Bölter 2011; Bockheim 2015). Debido a esto, la disponibilidad de nutrientes depende principalmente de la presencia de fuentes externas que sean capaces de incorporar materia al

ambiente (Greenfield 1992), siendo una de las más importantes, la presencia de colonias de pingüinos y la deposición y volatilización de sus desechos orgánicos (Bokhorst et al. 2007; Zwolicki et al. 2015; Otero et al. 2018).

Los pingüinos, como muchas otras aves marinas, se aparean en colonias (Williams 1995), congregando una alta densidad de individuos y generando la acumulación de gran cantidad de desechos en los ecosistemas costeros (Otero et al. 2018). Los nutrientes que se liberan en mayor porcentaje corresponden a nitrógeno (N) y fósforo (P). El N se libera principalmente en la forma de ácido úrico, y durante su mineralización se producen diferentes formas de N: (a) la amonificación produce  $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4^+$ , y (b) la nitrificación produce  $\text{NO}_3^-$  por oxidación de  $\text{NH}_4^+$ . En condiciones alcalinas, típicas de las heces de aves marinas, el  $\text{NH}_3$  se volatiliza rápidamente y se transforma en  $\text{NH}_4^+$ , que se transporta fuera de la colonia a través del aire o la deposición y escorrentía en el suelo. Por el contrario, el P tiene una movilidad mucho más reducida. Este elemento se encuentra en varias formas químicas en el material fecal de las aves marinas, pero el más móvil y biodisponible es el ortofosfato ( $\text{HPO}_4^-$ ), que puede lixiviarse (solubilizarse) en aguas subterráneas o superficiales (Otero et al. 2018).

Debido al proceso de crioturbación, y al intenso y constante aporte de desechos orgánicos, ocurre en el suelo una profunda mezcla de detritus y el sustrato. Dependiendo además de las condiciones climáticas y la influencia de agua, distintas reacciones también pueden suceder, generando la mineralización de

distintos compuestos, así como la acumulación de estos en el suelo. Así, aquellos suelos formados con una fuerte influencia animal, y que recurrentemente son observados en las zonas costeras de la península Antártica, son llamados suelos ornitogénicos (Simas et al. 2007).

Se ha observado que las colonias de pingüinos funcionan como una bomba de nutrientes entre ecosistemas marinos y terrestres, los cuales podrían ser absorbidos por la vegetación incluso a más de 1 km de distancia desde su origen debido a la dispersión a través del viento, teniendo efecto también en las comunidades de invertebrados asociadas a esta vegetación (Bokhorst et al. 2019).

Esto es posible de corroborar a través de análisis de isótopos estables de N, específicamente, a través del  $\delta^{15}\text{N}$ , el cual en conjunto al  $\delta^{13}\text{C}$ , se ha establecido como una herramienta potente para trazar el origen de nutrientes y otros compuestos orgánicos desde sus primeras utilidades a mediados del siglo pasado (Mateo et al. 2004). En términos simples, los isótopos son átomos de un mismo elemento que difieren únicamente en el número de neutrones, manteniéndose idénticas sus propiedades químicas, pero modificando el peso de éste (Mateo et al. 2004). Esta diferencia en el peso conduce a un fraccionamiento isotópico, el cual puede ocurrir de distintas formas en los sistemas naturales. El fraccionamiento isotópico mediado por procesos biológicos es llamado también “Discriminación isotópica”, y ocurre porque el isótopo más ligero (con una masa

atómica más baja) forma enlaces que se rompen más fácilmente. Por lo tanto, es más reactivo y es probable que se concentre en el producto más rápido y más fácilmente que el isótopo más pesado (Dawson et al. 2002).

Debido a dicha discriminación, es en los años 70 que se sugiere que la cuantificación de  $\delta^{15}\text{N}$  podría ser útil para determinar la fuente de nitrógeno (fijación, orgánico, inorgánico) en plantas (Kohl et al. 1973; Shearer et al. 1978), y si bien dicha interpretación se considera actualmente incorrecta (Dawson et al. 2002), la relevancia que tuvo años atrás popularizó su uso, dando paso a una nueva metodología en la investigación ecofisiológica. En este sentido Wada et al. (1986) observó que las cantidades de  $\delta^{15}\text{N}$  van en aumento en la cadena trófica de los ecosistemas marinos antártico. Gracias a estudios de esta índole, se instaló la premisa de que en las cadenas tróficas “eres lo que comes”, existiendo un traspaso de la firma isotópica de  $\delta^{15}\text{N}$  desde un nivel trófico a otro superior (Robinson 2001). De esta forma, es posible determinar los efectos que pueden tener las concentraciones de nutrientes derivados de organismos animales sobre la acumulación de éstos en plantas y sustratos cercanos a las fuentes. Por ejemplo, Skinner et al. (2006) demostró que el  $\text{NH}_3$  volatilizado desde los desechos orgánicos provenientes de una granja ganadera con más de 2900 cerdos, se concentra en mayor medida a pocos metros de la fuente de emisión, y disminuye rápidamente conforme aumenta la distancia, mientras que la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  del  $\text{NH}_3$  volatilizado presentó valores significativamente más negativos en las zonas cercanas a la fuente, y fue en aumento hasta estabilizarse con el

ambiente a unos 200 metros de distancia. De manera similar, en este mismo reporte, los musgos presentes en el área de estudio mostraron una mayor concentración de N en zonas cercanas a la granja, así como una firma de  $\delta^{15}\text{N}$  muy similar a la de su ambiente inmediato.

En este sentido, las preguntas que este estudio busca responder, corresponden a: 1) ¿Los nutrientes excretados por los pingüinos están siendo captados por los musgos?, y 2) ¿Cuánta es la distancia de dispersión de estos nutrientes? En base a esto, se hipotetiza que la presencia de la colonia de pingüinos influenciará en gran medida la presencia de N en la vegetación colindante, siendo este derivado principalmente de los desechos orgánicos de estas aves. Además, a medida que la distancia desde la pingüinera aumenta, la vegetación presentará menores concentraciones de N, así como una firma de  $\delta^{15}\text{N}$  cada vez más positiva, reflejando una menor influencia de los desechos orgánicos animales.

Por otro lado, los musgos, gracias al crecimiento usualmente colonial, formando carpetas o cojines, tienen una gran capacidad para capturar y acumular materia transportada por aire, contribuyendo a la formación del suelo (Smith 1982). Estas especies también tienen un alto impacto en la meteorización del sustrato que las sostiene, favoreciendo la formación de suelo orgánico, y mediando también la síntesis de minerales secundarios (Schwartzman 1999).

El aporte de materia orgánica al suelo también proviene en cierta medida de la muerte y descomposición de las plantas que lo habitan. Dicho proceso es lento

en las zonas antárticas y puede ser afectado por la temperatura, la cantidad de bacterias presentes, o la congelación del material orgánico (Fenton 1980).

En el caso de los musgos, estos se descomponen desde la base, acumulando desechos en la superficie, y en muchos casos, las tasas de pudrición disminuyen a mayor profundidad en el suelo (Fenton 1978). Influye también la humedad; aquellos musgos asociados a sectores más secos se descomponen más lento (Beyer & Bölter 2002). Debido además a que liberan sustancias que inhiben el crecimiento bacterial, los musgos retrasan aún más la descomposición de su materia orgánica muerta (Banerjee & Sen 1979), propiciando una mayor acumulación de restos bajo los brotes vivos. Todo esto en muchos casos conlleva a una lenta, pero gran acumulación de material orgánico entre el suelo y las capas vivas.

En términos de desarrollo, la mayoría de las briófitas polares son perennes, pero el tiempo de crecimiento de los brotes vivos varía ampliamente. Los brotes de especies formadoras de carpetas o montículos pueden crecer de forma continua durante 2 años o más, o hasta morir durante el invierno, para luego ser reemplazados por ramificaciones de posición subapical (e.g. *Sanionia* sp.; Callaghan & Collins 1981). En muchos otros casos, bajo la sección verde del musgo, caulidios café de varios centímetros de largo son capaces de formar rizoides o rizomas, y regenerar nuevos brotes incluso a distancia de los brotes originales (Longton 1974, 1979).

Así por ejemplo, especies como *Polytrichastrum alpinum* suele crecer con caulidios erectos de varios centímetros y escasamente ramificados, formando cojines o turbas de varios centímetros de diámetro, comúnmente en laderas y suelos con buen drenaje (Beyer & Bölter 2002). Al igual que otras especies, *P. alpinum* puede desarrollar brotes que se extiendan profundamente en el suelo, aportando también a la oxigenación del sustrato (Longton 1972).

Por el contrario, *Sanionia uncinata* se establece en sectores más húmedos, incluso al costado de corrientes de agua derivadas del derretimiento de nieve, y suele agregarse formando carpetas sobre el terreno, con constantes ramificaciones y poco crecimiento geotrópico (Ochyra et al. 2008).

Estas diferencias en el desarrollo podrían propiciar diferentes procesos y velocidades de descomposición, generando diversos aportes al sustrato y al ciclaje de nutrientes. De esta forma, cabe la posibilidad de que las distintas especies de musgos estén cumpliendo diferentes roles ecológicos, los cuales son de gran relevancia en ecosistemas extremos, dónde la vegetación criptogámica cumple el rol basal y fundamental en el sustento del ecosistema.

Teniendo en cuenta esto, se hipotetiza que la concentración de C cuantificada en los musgos, así como el aporte de este nutriente al suelo, presentará un patrón especie específico.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia y determinar el alcance del N emanado desde las colonias de pingüinos sobre el contenido de este nutriente en las comunidades de musgos colindantes y vecinas.

Además, determinar diferencias especie específicas en la incorporación de C hacia el sustrato.

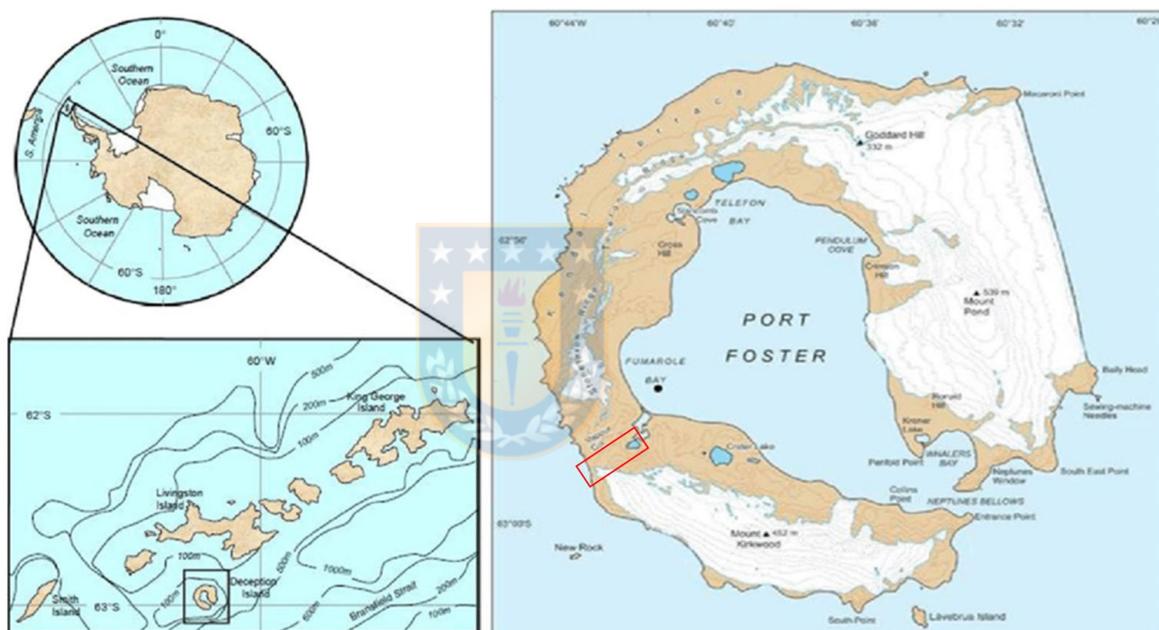
### 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Mapeo y caracterización de la vegetación en un transecto desde la pingüinera.
- b) Determinar los contenidos de N y C en los musgos detectados y los suelos asociados a lo largo del transecto.
- c) Determinar el valor de la firma isotópica de  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  tanto en musgos como suelo.
- d) Calcular los coeficientes de C/N en las diferentes especies de musgos, así como a lo largo del transecto.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. SITIO DE TRABAJO

El área de estudio (figura 1) está situada en la Isla Decepción ( $62^{\circ} 57'S$   $60^{\circ} 38' W$ ), más específicamente, en el área comprendida entre el Lago Irizar y la pingüinera de Bahía Descubierta, el cual es accesible mediante un sendero a pie.



**Figura 1: Ubicación de la Isla Decepción en el Archipiélago de las Shetland del Sur, en la Península Antártica. En el recuadro rojo se resalta el área de trabajo específica de este estudio.**

La Isla Decepción, perteneciente a las Islas Shetland del Sur, en la cercanía de la Península Antártica, corresponde a una isla volcánica con su caldera inundada. Las rocas más antiguas (pre-caldera) son las del grupo Puerto Foster, con alrededor de 750 mil años de antigüedad (Smellie 2002). Según los registros

existentes, han ocurrido 4 erupciones volcánicas en la isla en los últimos 200 años; 1842, 1967, 1969, y 1970 (Pallas et al. 2001), por lo que gran parte de la isla se encuentra cubierta de material piroclástico. Los suelos son poco profundos y con frecuencia presentan horizontes líticos, paralíticos o permafrost en los primeros 100 cm. Todos los suelos tienen un alto contenido de grava (30–90%) y una textura arenoso-esquelética (Bockheim 2015).

En cuanto a las condiciones climáticas, la temperatura media anual del aire en la Isla Decepción es cercana a -2 °C al nivel del mar (Simonov 1977). La temperatura media de los meses más cálidos (enero) y más fríos (agosto) es 1.1 ° C y -10 ° C, respectivamente. La precipitación media anual es de 510 mm, de los cuales 100 mm caen como lluvia durante el verano. El promedio de cobertura de nubes es del 50%, y la humedad relativa generalmente oscila entre el 80 y el 90% (Bockheim 2015).

Respecto a la avifauna, la isla se caracteriza por ser hábitat de más de 70.000 parejas reproductivas de pingüinos barbijo (*Pygoscelis antarcticus*, Forster, (1781)) que llegan durante el verano austral, y que se distribuyen de forma irregular en 8 puntos distintos de la isla (Naveen et al. 2012). De estos, alrededor de 19.000 parejas reproductivas arriban a la pingüinera de Bahía Descubierta cada verano (Naveen et al. 2012), aunque este número ha sido variable en los últimos 35 años; Para 1988, se estima que alrededor de 15.000 parejas

reproductivas llegaron a Bahía Descubierta (Naveen et al. 2012), mientras que Barbosa et al. (1997), cuantificó en 1997 un estimado de 20.000.

Además, la isla es hábitat de otras aves marinas, principalmente Skúas (*Stercorarius* spp.), que anidan sobre alfombras de musgos y también se reproducen durante el verano. En el transecto establecido para este estudio, se detectó al menos un nido relictual y/o uno en actual uso en cada uno de los sectores definidos.

## **5.2. DISTRIBUCIÓN DE COMUNIDADES DE MUSGOS EN EL TRANSECTO HASTA LA PINGÜINERA**

Se realizaron mapeos de la vegetación, utilizando el equipo Juno 5D de Trimble, el cual permite la captura de puntos, líneas y polígonos con alta precisión, facilitando el procesamiento de los datos una vez capturados.

Dichos mapeos se realizaron sobre cada una de las carpetas de musgos detectada en el transecto. Esto fue realizado utilizando la función de captura de polígonos del equipo Juno, y caminando alrededor de los parches de vegetación, considerando el límite de su extensión como aquella zona donde los cojines o manchones de musgos se volvieron demasiado escasos o distanciados entre sí, perdiéndose la continuidad del parche. Una vez determinada la extensión de la vegetación, se estimó la cobertura total de musgos a partir de la observación de la continuidad o discontinuidad de estos en el área. Se determinó también la

especie más abundante en cada parche, y se registraron datos del terreno, como el sustrato o la exposición.

Con dichos datos, se realizaron mapas de vegetación del sector, destacándose la especie más abundante en cada carpeta.

### **5.3. TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE CARBONO/NITRÓGENO**

Se recolectaron muestras de musgos utilizando sacabocados de 2 cm de diámetro, obteniéndose parte de la especie y del suelo asociado como se ha reportado en Prather et al. (2019). Estas muestras fueron tomadas a lo largo de todo el sitio de trabajo, en puntos de muestreos separados entre sí y fijados principalmente por la presencia de vegetación dentro del área. En cada punto, se tomaron como mínimo tres muestras de cada especie detectada. De dichas muestras, al menos una de cada musgo considerado como una especie distinta, fue apartada para la identificación taxonómica, las que fueron enviadas al Doctor Juan Larraín Benoit, experto en briología, quien se encargó de la determinación específica.

Las zonas verdes (zonas activas) del musgo, zonas muertas, y el suelo orgánico y mineral bajo estas fases fueron separadas, pesadas, y almacenadas en recipientes separados.

De estos productos separados, se tomó alrededor de 0,1 gramos de restos verdes del musgo y fueron molidos utilizando un mortero. El polvo obtenido de cada

muestra molida fue almacenado en un tubo Eppendorf independiente. Trabajo similar se realizó con las muestras de suelos asociados a estas muestras.

Adicionalmente, se recolectaron muestras de guano de pingüino, tanto seco como fresco, las cuales recibieron un tratamiento igual al de las muestras de musgos y suelo, previamente descrito.

Todas las muestras ya procesadas, fueron enviadas a análisis químicos en el Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello, sede Viña del Mar (LAI-UNAB), donde se determinó el contenido de carbono y nitrógeno (en porcentaje) en las muestras, además de las firmas de isótopos estables  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ . Estándar utilizado L-Glutamic Acid USGS40 y USGS41a abundancia natural y enriquecida.



#### **5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Se evaluó la presencia de diferencias significativas en los valores promedios de los contenidos de carbono, nitrógeno, y la relación de éstos (C/N), así como las firmas isotópicas, entre grupos de sitios. Estos grupos fueron conformados acorde a su posición en el transecto. Para esto, se utilizaron principalmente análisis de varianza (ANOVA o Kruskal-Wallis según corresponda).

Los datos obtenidos para los distintos parámetros medidos fueron considerados como variables dependientes, y fueron comparados entre sitios, sector, o especie, utilizando los promedios de los datos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y LA VEGETACIÓN

Se registró un total de 10 especies de musgos distintas (tabla 1), las cuales se distribuyeron de forma irregular a lo largo del transecto. Estas especies fueron en su mayoría de amplia distribución en la Península Antártica, a excepción de *Bryum orbiculatifolium* Cardot & Broth, que se distribuye principalmente en islas volcánicas de las Shetland del Sur y las Islas Sandwich, y *Syntrichia saxicola* (Cardot) R.H.Zander, que en la Antártica se encuentra restringida a la zona norte de la península. Todas estas especies ya habían sido registradas anteriormente en la Isla Decepción.

**Tabla 1:** Lista de especies encontradas en el área de trabajo. Se describe el sustrato preferido por la especie acorde a las descripciones realizadas por Ochyra et al. (2008).

Especie	Sustrato preferido por la especie
<i>Bartramia patens</i> Brid.	Con acumulación de suelo o materia orgánica.
<i>Brachythecium austrosalebrosus</i> (Müll.Hal.) Kindb.	Sustrato arenoso o de grava, asociado a escorrentía de agua. También en rocas y grietas.
<i>Bryum orbiculatifolium</i> Cardot & Broth.	Suelos tibios, escoriales secos, pendientes cenicientas.

<p><i>Bryum pseudotriquetrum</i> (Hedw.) G.Gaertn., B.Mey. &amp; Scherb.</p>	<p>En la antártica marítima, es frecuente su presencia en zonas húmedas.</p>
<p><i>Hennediella heimii</i> (Hedw.) R.H.Zander</p>	<p>No tiene, aunque es colonizador primario. Soporta sustratos de grava, lodo, y minerales.</p>
<p><i>Polytrichastrum alpinum</i> (Hedw.) G.L.Sm.</p>	<p>Suelos minerales, arcillosos y de grava, en suelos rocosos, al costado de deshielos.</p>
<p><i>Sanionia georgicouncinata</i> (Müll.Hal.) Ochyra &amp; Hedenäs</p>	<p>Especialmente frecuente en los márgenes más secos de las zonas pantanosas, en los últimos nevados y a lo largo de los arroyos y los deshielos, así como en terrenos pedregosos casi estériles y con heladas.</p>
<p><i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske</p>	<p>Ninguna. Crece en variados tipos de sustratos, secos o húmedos, o incluso sumergida. Usualmente también al costado de escorrentías.</p>
<p><i>Syntrichia filaris</i> (Müll.Hal.) R.H.Zander</p>	<p>Sustratos húmedos o asociados a cuerpos de agua.</p>

<p><i>Syntrichia saxicola</i> (Cardot) R.H.Zander</p>	<p>Por lo general, crece en hábitats secos, aunque con frecuencia también ocurre en lugares húmedos.</p>
---	--

De todas las muestras colectadas, un total de 158 de estas fueron enviadas a análisis químico de suelo y/o musgos. No todas las muestras fueron utilizadas en los análisis estadísticos realizados, descartándose aquellas cuyos contenidos de C y N, o las firmas de isótopos estables, no pudieron ser cuantificados. Tras este filtro, un total de 110 muestras fueron efectivamente comparadas, las cuales derivaron de diversos puntos del transecto, los cuales se agruparon en 4 sectores acorde a las características del terreno y el ambiente en general (Figura 2), cada uno incluyendo uno o más sitios o puntos de muestreos:

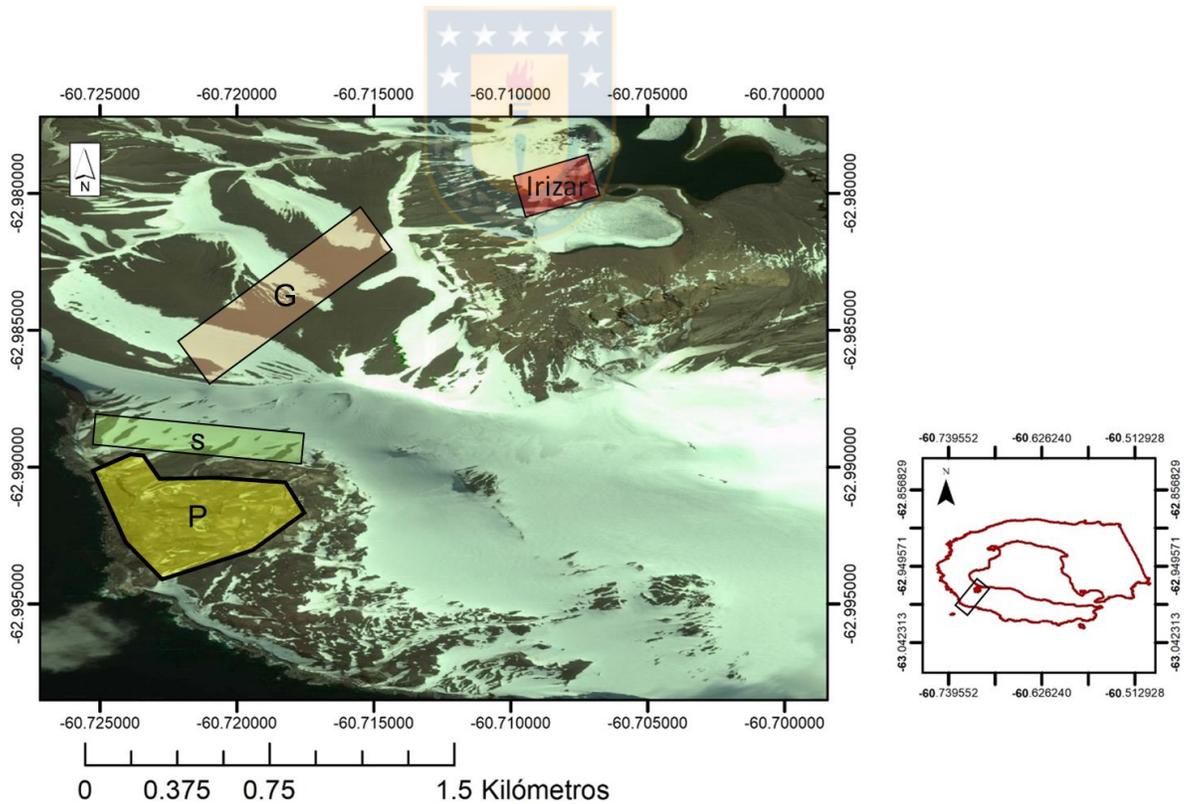
- a) Sitios P, el cual se encuentra inmerso entre nidos de algunos de los más de 19000 pingüinos barbijos que conforman la colonia, caracterizado principalmente por la alta presencia de desechos orgánicos (fecas), y la cobertura de algas terrestres en zonas de poco tránsito de pingüinos. Este grupo incluye únicamente muestras de suelo debido a la ausencia de tapetes de musgos inmersos entre los nidos. Dichas muestras fueron obtenidas desde el guano, fecas frescas, y bajo la cobertura de algas (*Prasiola crispa* (Lightfoot) Kützing). Un total de 14 muestras obtenidas en estos sitios fueron analizadas.

- b) Sitios S, que al igual que Sitios P, se encuentra en la zona exterior de la isla, en una zona inclinada que va desde los 30 hasta los 80 msnm. Caracterizado por una gran cobertura de musgos y una alta presencia de *P. alpinum* y *S. uncinata*. Incluye un total de 5 puntos de muestreos: S1, S2, S2-S3, S3 y S4. Un total de 43 muestras obtenidas en estos sitios fueron analizadas.
- c) Sitios G, ubicado en la zona montañosa del transecto, yendo desde los 60 hasta los 120 msnm. Caracterizado por la presencia de diversos tapetes de musgos usualmente con exposición norte. Este grupo incluye los puntos G2, G4, y G5. Un total de 48 muestras obtenidas en estos sitios fueron analizadas.
- d) Sitio Irizar, ubicado en la zona interior de la isla y cercana al nivel del mar. Caracterizado por presentar un tapete vegetacional amplio, con presencia de nidos actuales y relictuales de Skuas. Además, está ubicado justo al costado del Lago Irizar. Un total de 5 muestras obtenidas en estos sitios fueron analizadas.

El área de extensión de los sitios y de los musgos fue bastante variable (tabla 2). Por el contrario, la especie más abundante en cada uno de los sitios fue siempre *P. alpinum* o *S. uncinata*. Además, la presencia de las especies no fue regular en todo el transecto, siendo algunos musgos exclusivos de algún sitio de muestreo (tabla 3).

**Tabla 2:** Área de extensión de los sitios de muestreos y de la vegetación asociada a estos.

Sitio	Extensión aproximada	Extensión de la Vegetación
Pingüinera	44000 m <sup>2</sup>	-
Sitios S	41000 m <sup>2</sup>	12166,16 m <sup>2</sup>
Sitios G	81000 m <sup>2</sup>	12929,5 m <sup>2</sup>
Sitio Irizar	7375,25 m <sup>2</sup>	4081,19 m <sup>2</sup>



**Figura 2:** Imagen obtenida de Google Earth representativa de cada sector de muestreo en el transecto. **P** corresponde al área de extensión de la colonia de

pingüinos. **S** corresponde al sector “Sitios S”. **G** corresponde al sector “Sitios G”. **Irizar** corresponde al sector “Sitios Irizar”. El mapa en la esquina inferior derecha muestra la ubicación del transecto en la isla Decepción.

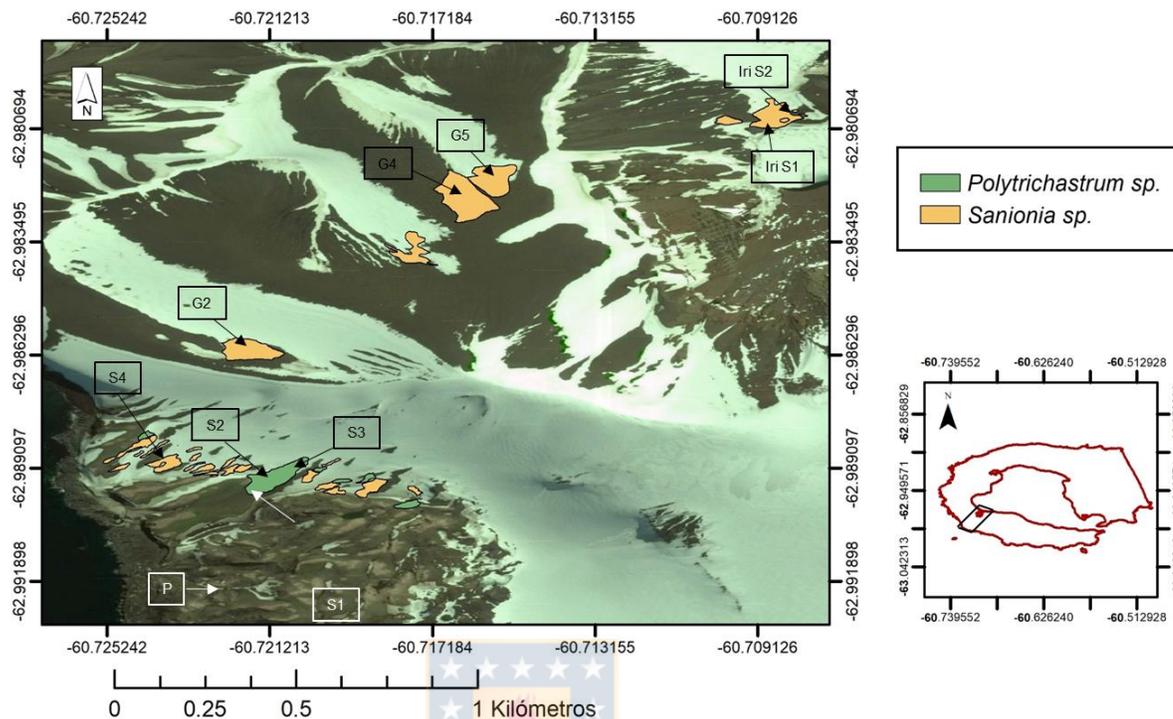
**Tabla 3:** Lista de especies de musgos registradas en el transecto y los sitios en las cuales fueron muestreadas.

Especie	Presencia en sitios
<i>Bartramia patens</i> Brid.	S4, G2
<i>Brachythecium austrosalebrosus</i> (Müll.Hal.) Kindb.	S2, G2
<i>Bryum orbiculatifolium</i> Cardot & Broth.	S1
<i>Bryum pseudotriquetrum</i> (Hedw.) G.Gaertn., B.Mey. & Scherb.	S1, S4, G5
<i>Henediella heimii</i> (Hedw.) R.H.Zander	S2-S3
<i>Polytrichastrum alpinum</i> (Hedw.) G.L.Sm.	S3, S4, G2, G5, IriS1, IriS2
<i>Sanionia georgicouncinata</i> (Müll.Hal.) Ochyra & Hedenäs	G5
<i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske	S1, S2, S2-S3, S3, S4, G2, G4, IriS1, IriS2

<i>Syntrichia filaris</i> (Müll.Hal.) R.H.Zander	G2, G5
<i>Syntrichia saxicola</i> (Cardot) R.H.Zander	G4

## 6.2. MAPEO DE LA VEGETACIÓN

En todo el transecto, fueron dos especies las que tuvieron una mayor cobertura en cada tapete de vegetación (figura 3). Estas corresponden a *P. alpinum* y *S. uncinata*. En la mayoría de los sitios, se observó una cobertura discontinua del sustrato, existiendo cojines y parches de musgos separados entre sí, aunque lo suficientemente juntos como para considerarlos parte de una misma comunidad o tapete vegetacional. Aquellos musgos creciendo aislados, sin mayor extensión que la propia del individuo, no fueron mapeados.



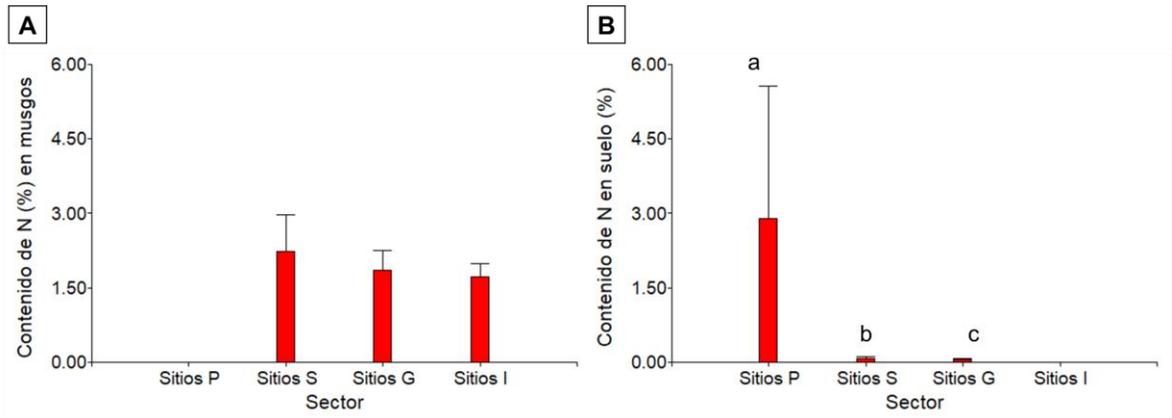
**Figura 3:** Mapeo de la vegetación observada en el transecto de trabajo. Las flechas indican el código de cada sitio de muestreo. **P** corresponde a las muestras de suelo obtenidas desde la colonia de pingüinos. El color de cada polígono representa la especie más abundante en el sitio. El mapa en la esquina inferior derecha muestra la ubicación del transecto en la isla Decepción.

### 6.3. CONTENIDO DE NITRÓGENO EN LAS MUESTRAS FOLIARES Y DE SUELO

Con un promedio de 2,01% (D.E= 0,59; n=87), el contenido de N en musgos fluctuó entre un 1,32% y 4,03%, siendo relativamente estable a lo largo del transecto, y no se detectaron diferencias significativas entre las medias de cada

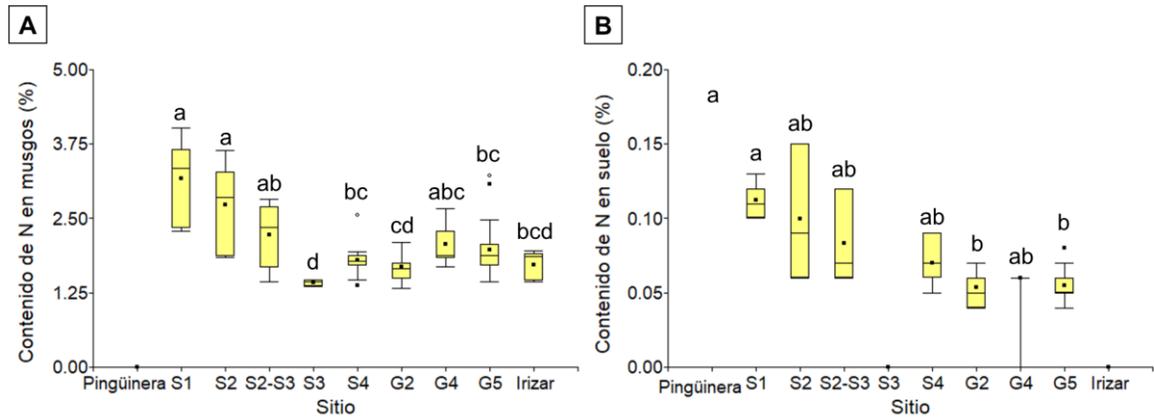
sector (Figura 4A, Kruskal-Wallis;  $H= 5,08$ ;  $p= 0,0789$ ), aunque sí existieron variaciones entre las medias de cada sitio por sí solo (Figura 5A), denotándose en este caso una tendencia hacia la disminución del contenido de N en las muestras de musgos. En cuanto al promedio por sector (en musgos), éste disminuyó desde los Sitios S hacia los Sitios I, fluctuando desde 2,23% (D.E.= 0,74;  $n= 37$ ) en los Sitios S, hasta 1,72% (D.E.=0 0,26;  $n= 5$ ) en los Sitios I. En los Sitios G se obtuvo un valor promedio de 1,86% (D.E.= 0,4;  $n=45$ ), y en los Sitios P no encontramos musgos.

Por otro lado, los suelos presentaron un amplio rango de contenido de N, donde los valores más altos se concentraron en la Pingüinera, fluctuando entre 0,1% a 6,45% en este sector. Los suelos que no estuvieron asociados a la Pingüinera presentaron valores de N bastante bajos, fluctuando entre 0,04% y 0,15%, siendo significativamente distintos (Kruskal-Wallis;  $H= 32,64$ ;  $p= <0,0001$ ) cada uno de los sectores entre sí (Figura 4B). Además, existió una tendencia a la disminución en la cantidad de este nutriente desde la pingüinera hacia el interior, considerando tanto los 3 sectores como cada sitio por separado (Figura 5B), de esta forma, los promedios por sector fueron: Sitios P= 2,89% (D.E.= 2,67;  $n=13$ ), Sitios S= 0,08% (D.E.= 0,03;  $n=21$ ), y Sitios G= 0,03% (D.E.= 0,01;  $n=23$ ). En los Sitios I no se tomaron muestras de suelo, por lo cual no existen datos para este sector.



**Figura 4:** Contenido promedio de nitrógeno (en porcentaje) en musgos (A,  $n= 87 \pm DS$ ) y en suelos (B,  $n= 57 \pm DS$ ) según sector de muestreo. Aquellas barras que no comparten una misma letra, presentaron diferencias significativas entre sí (Kruskal-Wallis,  $P \leq 0,05$ ).

Al comparar el contenido de N entre sitios de muestreo (fig 5), se observan tendencias a la disminución en el contenido de N en las muestras de suelo y musgos desde la Pingüinera hacia el interior de la isla, existiendo diferencias significativas en ambos casos. Es importante destacar la diferencia entre las escalas en el caso de la fig. 5, debido a la baja cantidad de N contenida en el suelo al contrastarla con la observada en musgos. Además de eso, en la figura 5B los valores obtenidos para el sitio Pingüinera no son mostrados debido a la gran diferencia entre este dato y el resto de los sitios (Promedio N pingüinera= 2,89%; D.E.= 2,67; Valor máximo= 6,45%; Valor mínimo= 0,07%), lo que dificulta su visualización conjunta.



**Figura 5:** Gráfico de cajas para el contenido de nitrógeno (en porcentaje) en cada sitio de muestreo para musgos (A,  $n = 87 \pm DS$ ) y suelos (B,  $n = 57 \pm DS$ ). Las diferencias significativas (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ) presentes en ambos casos por separados se representan a través de las letras sobre las cajas: aquellos sitios que no comparten una letra en común, poseen diferencias significativas entre sí.

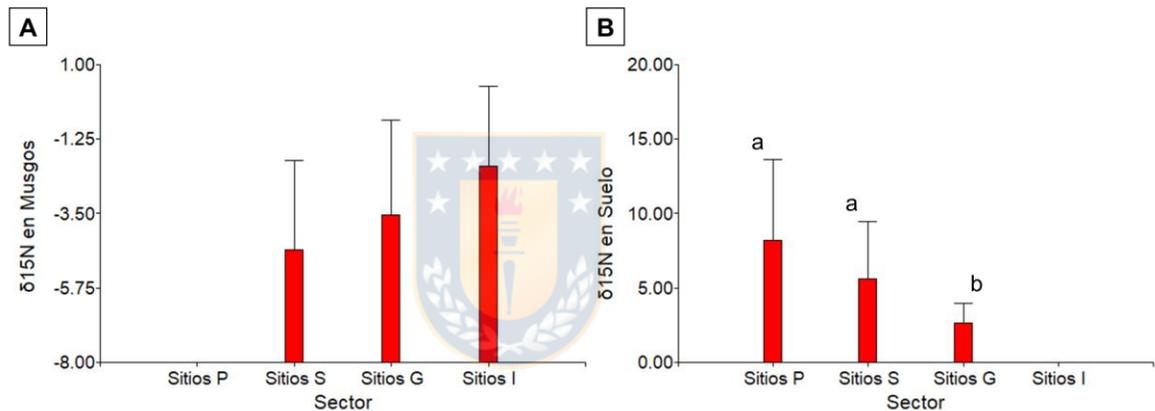
#### 6.4. VALORES DE LA FIRMA DE $\delta^{15}N$ EN MUSGOS Y SUELOS

Por otro lado, la firma de  $\delta^{15}N$  no presentó diferencias significativas en las muestras de musgos a lo largo del transecto (fig. 6A,  $n = 87$ , Kruskal-Wallis;  $H = 5,42$ ;  $p = 0,0665$ ), aunque existió una tendencia al aumento en el valor promedio de  $\delta^{15}N$  a medida que la distancia de la pingüinera fue mayor.

De manera global, la firma de  $\delta^{15}N$  en las muestras foliares varió entre -11,3 y 3,7, siendo la mayoría de los datos menores a cero (sólo 11 muestras de 87 presentaron valores positivos). En cuanto a los sectores, Sitios S promedió -4,6

(D.E.= 2,72; n=37), Sitios G promedió -3,53 (D.E.= 2,86; n=45) y finalmente, Sitios I promedió -2,06 (D.E.= 2,4; n=5).

Caso contrario ocurrió en el suelo asociado a estas muestras (Figura 6B); un total de 60 muestras analizadas demostraron una notoria disminución en el valor de la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  desde la Pingüinera hacia el interior.



**Figura 6:** Valor promedio de la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en las muestras de musgos (A, n= 87  $\pm$  DS) y suelos (B, n=56  $\pm$  DS). Aquellas barras que no comparten una misma letra, presentaron diferencias significativas entre sí (Kruskal-Wallis, p< 0,05).

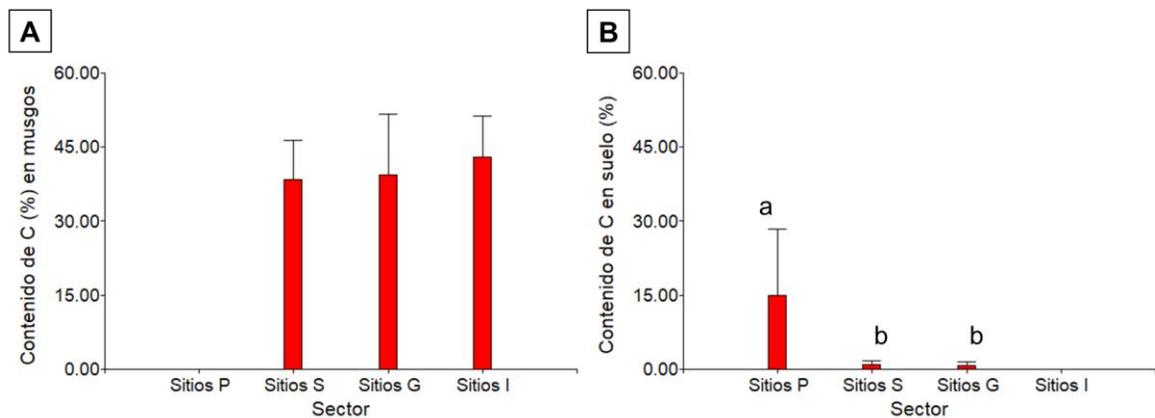
Dicha disminución fue significativa (Kruskal-Wallis; H= 17,07; p= 0,0002), al menos entre Sitios G y los otros dos sectores (figura 6B), denotando la influencia de la pingüinera sobre el nitrógeno del suelo. De forma global, los valores de las muestras fluctuaron entre 0,64 y 22,06 (n=56), mientras que por sectores, los

valores promedio obtenidos fueron: Sitios P= 8,2 (D.E.= 5,43; n=12), Sitios S= 5,64 (D.E.= 3,8; n=21), y Sitios G= 2,65 (D.E.= 1,33; n=23).

Destáquese además la diferencia en las escalas en el caso de la figura 6, debido a la notable diferencia entre los valores de  $\delta N$  obtenidos para suelos y musgos, que dificultan su comparación visual en este tipo de gráficos.

### 6.5. CONTENIDO DE C EN PORCENTAJE EN LAS MUESTRAS DE MUSGOS Y SUELOS

En cuanto al contenido de C, los musgos presentaron en general cantidades mucho mayores que el suelo, siendo este último bastante pobre en C en los Sitios S y G (Figura 7).



**Figura 7:** Contenido promedio de carbono (en porcentaje) contenido en muestras de musgos (A,  $n= 87 \pm DS$ ) y suelos (B,  $n=60 \pm DS$ ). Estos últimos presentaron diferencias significativas (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ), las cuales se evidencian a

través de las letras sobre las barras: aquellas barras que no comparten una letra en común, poseen diferencias significativas entre sí.

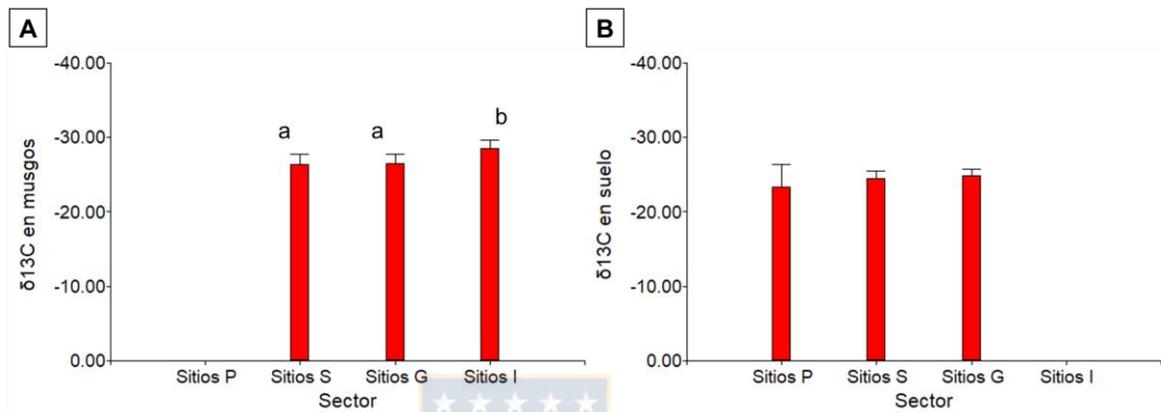
En los musgos (fig. 6A, n= 87), el C promedio no presentó diferencias significativas entre Sectores (Kruskal-Wallis; H= 1,43; p= 0,4880) y de igual manera, el contenido de C por sitios independientes (es decir, no agrupados en sectores) tampoco presentó diferencias significativas en ningún caso (Kruskal-Wallis; H= 5,53; p= 0,6997), obteniéndose valores relativamente similares en todo el transecto.

Por otro lado, en las muestras de suelo (fig. 6B, n= 60) el contenido de C fue bastante bajo, aunque de manera concordante, los suelos bajo los musgos no presentaron diferencias significativas entre sí en términos de contenido de C. Esto contrasta con los datos obtenidos en la pingüinera (Sitios P), donde las algas, fecas y guano acumulan más C en el suelo, en cantidades significativamente más altas que los suelos bajo musgos (Kruskal-Wallis; H= 16,06; p= 0,0003).

## **6.6. VALORES DE LA FIRMA DE $\Delta^{13}\text{C}$ EN MUSGOS Y SUELOS**

La firma de  $\delta^{13}\text{C}$  demostró ser significativamente variable en el caso de las muestras de musgo, más no en el caso de los suelos (Figura 8). A lo largo del transecto, el  $\delta^{13}\text{C}$  promedio tendió a la disminución (valores más negativos)

desde la Pingüinera hacia el interior, obteniéndose los valores más bajos en las muestras derivadas de los Sitios I.



**Figura 8:** Valor promedio de la firma de  $\delta^{13}\text{C}$  en musgos (A,  $n= 87 \pm \text{DS}$ ) y en suelos (B,  $n= 60 \pm \text{DS}$ ) agrupadas según sector. Aquellas barras que no comparten una misma letra, presentaron diferencias significativas entre sí (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ).

Al comparar las muestras de manera general (sin agrupar por sector), la firma de  $\delta^{13}\text{C}$  resultó ser poco variable, con desviaciones estándares menores a 2, tanto en las muestras de musgos como las de suelo, aunque al agruparse por sector, dichas diferencias se acentuaron un poco más.

En el caso de musgos (fig. 7A,  $n= 87$ ), la firma de  $\delta^{13}\text{C}$  mostró diferencias significativas entre sectores (Kruskal-Wallis;  $H= 9,25$ ;  $p= 0,0098$ ), siendo los Sitios S y los sitios G similares entre sí, y diferentes de los Sitios I, como indican

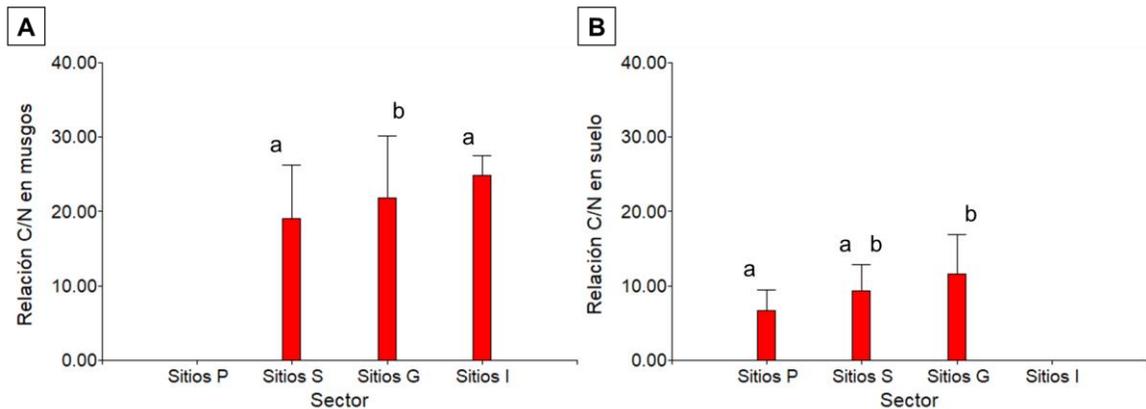
las letras encima de las barras. En cuanto a estos sectores, el promedio de la firma de  $\delta^{13}\text{C}$  en Sitios S fue -26,32 (D.E.= 1,47; n=37), en Sitios G fue -26,55 (D.E.= 1,18; n=45), y en Sitios I -28,52 (D.E.= 1,09; n=5).

Por otro lado, las muestras de suelo (fig. 7B, n= 60) no presentaron diferencias significativas entre sectores (Kruskal-Wallis; H= 4,17; p= 0,1242), aunque sí mostró una leve tendencia a la disminución del promedio (valores más negativos) de  $\delta^{13}\text{C}$  desde la Pingüinera (Sitios P; promedio= -23,30 D.E.= 3,09; n=14) hacia el interior (Sitios S; promedio= -24,43 D.E.= 1,04; n=22 y Sitios G; promedio= -24,83 D.E.= 0,86; n=24).



### 6.7. COEFICIENTE DE C/N EN MUSGOS Y SUELOS

Finalmente, la relación de C/N mostró una tendencia al aumento desde la pingüinera hacia el interior en el caso de suelos, no así en musgos, donde Sitios G y Sitios I no demostraron diferencias significativas (fig. 8A). Esta relación mostró ser variable también entre especies (tabla 4), siendo *P. alpinum* la especie con mayor relación C/N, debido a su alto contenido de C y bajo contenido de N (en comparación a las otras especies muestreadas). Por el contrario, *B. orbiculatifolium* presentó el valor de C/N más bajo en musgos, aunque curiosamente, presentó uno de los valores más altos de C/N en el suelo asociado.



**Figura 9:** Valor promedio del cociente de C/N en muestras de musgos (A,  $n=87 \pm DS$ ) y suelos (B,  $n= 57 \pm DS$ ). Ambos casos presentaron diferencias significativas entre sectores (Kruskal-Wallis,  $p < 0,05$ ), las cuales se indican con las letras sobre las barras: aquellas barras que no comparten una letra en común, poseen diferencias significativas entre sí.

En musgos ( $n= 87$ ), este cociente presentó diferencias significativas entre sectores (Kruskal-Wallis;  $H= 8,91$ ;  $p= 0,0116$ ), siendo Sitios G distinto a Sitios S y Sitios I. En este sentido, Sitios G, que acumuló la mayor cantidad de muestras entre estos tres sitios, se mostró más variable en los datos obtenidos (la mayor desviación estándar de los tres), incluyendo a su vez la mayor riqueza de especies en el sector (ver tabla 3). Los promedios obtenidos en cada sector fueron: Sitios S= 19,00 (D.E.= 7,25;  $n=37$ ), Sitios G= 21,85 (D.E.= 8,37;  $n=45$ ), y Sitios I= 24,87 (D.E.= 2,65;  $n=5$ ).

Para el suelo (fig. 8B,  $n= 57$ ) también se detectaron diferencias significativas entre sectores (Kruskal-Wallis;  $H= 9,61$ ;  $p= 0,0082$ ), siendo los Sitios P diferentes

a los Sitios G. Cabe destacar que en este caso, los suelos asociados a las muestras no corresponden en su totalidad a musgos, debido a la ausencia de estos en Sitios P. Los promedios obtenidos en cada sector fueron: Sitios P= 6,71 (D.E.= 2,8; n=13), Sitios S= 9,29 (D.E.= 3,58; n=21), y Sitios G= 11,63 (D.E.= 5,28; n=23).

#### **6.8. COMPARACIÓN DE CONTENIDOS DE CARBONO Y NITRÓGENO ENTRE ESPECIES DE MUSGOS**

Las especies muestreadas presentaron diferentes comportamientos respecto a la acumulación de carbono y nitrógeno, tanto en las zonas vivas del musgo, como en los suelos asociados. Al comparar los datos según especie, se presentaron diferencias significativas para todos los parámetros medidos ( $p \leq 0,05$ ), incluidos aquellos que no las mostraron al comparar las muestras por sector (como por ejemplo, el contenido promedio de C (%) en musgos), exceptuando la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en muestras foliares, que no presentó diferencias entre las medias.

Cabe recalcar que las especies no se distribuyeron de forma homogénea en el transecto (ver tabla 3), y en algunos casos se obtuvieron especies derivadas de un solo sitio, por lo que no fue posible determinar diferencias entre sectores para una misma especie. Además, debido a que en algunos casos se obtuvo datos para una sola muestra de la especie, no fue posible obtener una desviación estándar para dicha especie.

**Tabla 4:** Parámetros de C y N según especie. Se muestra el valor promedio  $\pm$  (desviación estándar). Los asteriscos representan una aproximación al valor de p obtenido en cada análisis. Aquellas especies que comparten una letra en común (en una misma columna), no presentan diferencias significativas en sus medias.

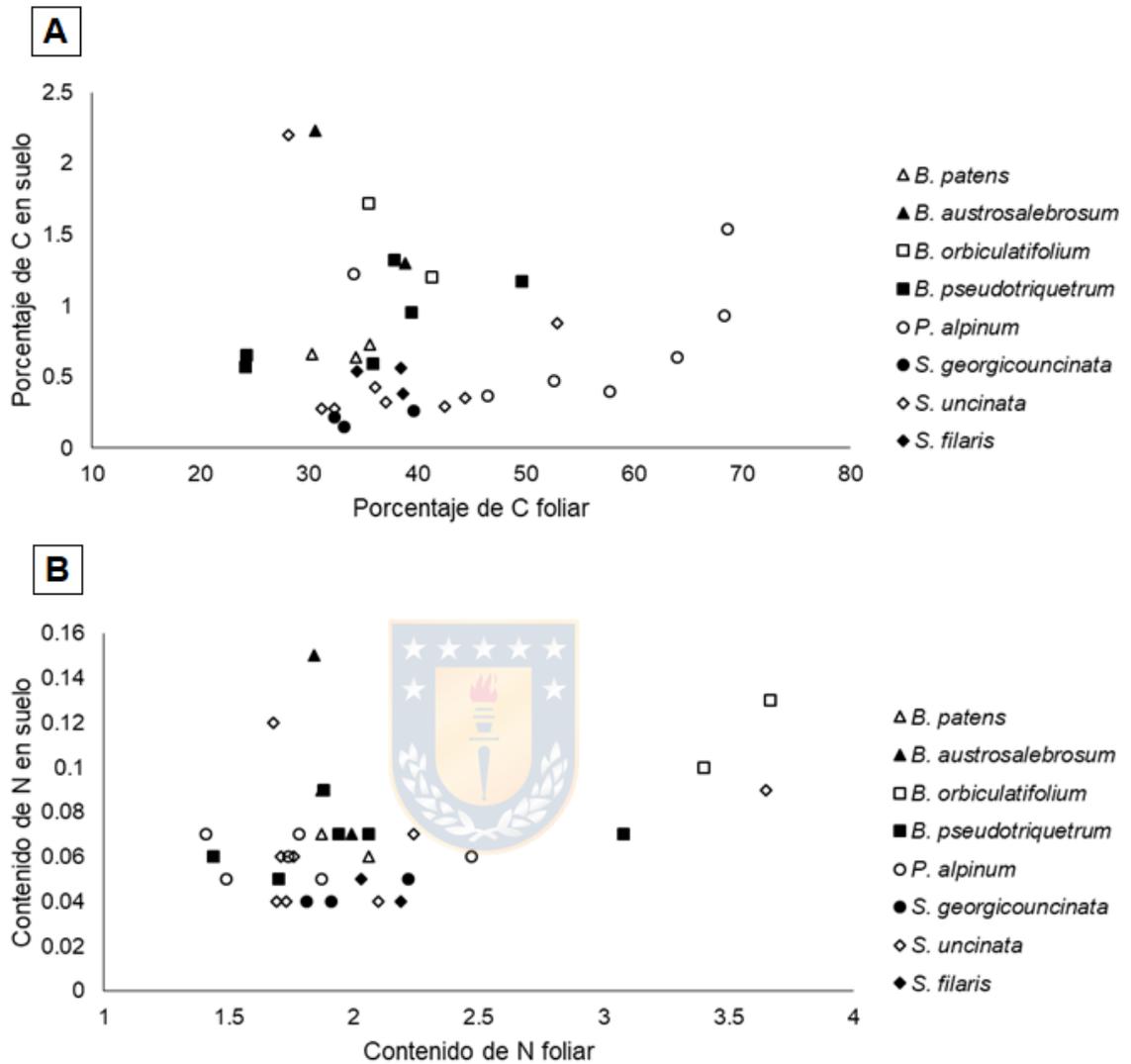
\*=  $p < 0,05$ ; \*\*=  $p < 0,01$ ; \*\*\*=  $p < 0,0001$

Muestra	n	$\delta^{15}N$	$\delta^{13}C^{***}$	Contenido de N (%)**	Contenido de C (%)**	Relación C/N***	
Muestras Foliates	<i>B. patens</i>	5	-4,30 (1,35)	-24,69 (1,55) <sup>C</sup>	1,75 (0,29) <sup>AB</sup>	29,02 (10,89) <sup>A</sup>	16,19 (5,31) <sup>A</sup>
	<i>B. austrosalebrosus</i>	4	-3,91 (0,51)	-26,94 (1,33) <sup>AB</sup>	1,82 (0,17) <sup>ABC</sup>	31,89 (5,28) <sup>A</sup>	17,62 (2,81) <sup>A</sup>
	<i>B. orbiculatifolium</i>	2	-5,39 (1,11)	-24,48 (0,05) <sup>C</sup>	3,54 (0,19) <sup>D</sup>	38,42 (4,12) <sup>ABC</sup>	10,96 (1,81) <sup>A</sup>
	<i>B. pseudotriquetrum</i>	10	-4,43 (2,55)	-25,83 (0,37) <sup>BC</sup>	2,04 (0,45) <sup>BCD</sup>	35,22 (7,72) <sup>AB</sup>	17,37 (1,90) <sup>A</sup>
	<i>H. heimii</i>	3	-3,18 (1,78)	-24,83 (0,60) <sup>C</sup>	2,66 (0,19) <sup>CD</sup>	42,86 (1,27) <sup>BC</sup>	16,17 (0,76) <sup>A</sup>
	<i>P. alpinum</i>	24	-3,02 (3,07)	-27,77 (0,92) <sup>A</sup>	1,64 (0,26) <sup>A</sup>	47,88 (11,01) <sup>C</sup>	29,85 (8,18) <sup>B</sup>
	<i>S. georgicouncinata</i>	6	-3,73 (3,51)	-26,57 (0,44) <sup>ABC</sup>	2,12 (0,56) <sup>BCD</sup>	36,82 (3,78) <sup>ABC</sup>	17,94 (2,75) <sup>A</sup>
	<i>S. uncinata</i>	27	-4,30 (3,20)	-26,55 (1,37) <sup>ABC</sup>	2,22 (0,72) <sup>BCD</sup>	36,83 (9,17) <sup>AB</sup>	17,69 (4,93) <sup>A</sup>
	<i>S. filaris</i>	5	-4,23 (2,99)	-25,90 (0,60) <sup>ABC</sup>	1,93 (0,20) <sup>ABCD</sup>	34,72 (5,38) <sup>AB</sup>	18,09 (2,93) <sup>A</sup>
	<i>S. saxicola</i>	1	-5,65 (-)	-25,91 (-) <sup>ABC</sup>	1,88 (-) <sup>ABCD</sup>	42,35 (-) <sup>ABC</sup>	22,68 (-) <sup>AB</sup>
Muestra	n	$\delta^{15}N^{**}$	$\delta^{13}C^{**}$	Contenido de N (%)**	Contenido de C (%)***	Relación C/N**	
Muestras de Suelo	<i>Fecas</i>	5	2,55 (0,44) <sup>AB</sup>	-25,13 (1,74) <sup>ABC</sup>	5,07 (1,14) <sup>C</sup>	18,56 (2,52) <sup>C</sup>	3,62 (0,46) <sup>A</sup>
	<i>Guano</i>	6	10,85 (6,01) <sup>C</sup>	-24,20 (1,63) <sup>BCDE</sup>	0,20 (0,22) <sup>C</sup>	2,08 (2,73) <sup>BC</sup>	8,87 (2,27) <sup>BCD</sup>
	<i>Prasiola crispa</i>	3	8,57 (1,52) <sup>BC</sup>	-18,47 (1,87) <sup>E</sup>	5,38 (0,32) <sup>C</sup>	35,03 (2,66) <sup>C</sup>	6,53 (0,76) <sup>ABC</sup>
	<i>B. patens</i>	3	3,55 (0,70) <sup>BC</sup>	-23,69 (1,21) <sup>CDE</sup>	0,07 (0,02) <sup>ABC</sup>	0,68 (0,05) <sup>AB</sup>	9,40 (1,28) <sup>BCD</sup>
	<i>B. austrosalebrosus</i>	2	7,41 (2,80) <sup>BC</sup>	-24,94 (0,01) <sup>ABC</sup>	0,11 (0,06) <sup>BC</sup>	1,77 (0,66) <sup>BC</sup>	16,72 (2,62) <sup>D</sup>
	<i>B. orbiculatifolium</i>	3	10,52 (1,66) <sup>C</sup>	-22,90 (0,17) <sup>DE</sup>	0,11 (0,02) <sup>C</sup>	1,39 (0,29) <sup>BC</sup>	12,54 (0,63) <sup>CD</sup>
	<i>B. pseudotriquetrum</i>	9	3,05 (1,03) <sup>AB</sup>	-24,46 (0,58) <sup>ABCD</sup>	0,07 (0,01) <sup>ABC</sup>	1,19 (0,89) <sup>BC</sup>	12,50 (3,50) <sup>CD</sup>
	<i>H. heimii</i>	1	- (-)	-24,54 (-) <sup>ABCDE</sup>	- (-)	2,83 (-) <sup>BC</sup>	- (-)
	<i>P. alpinum</i>	7	3,04 (1,07) <sup>AB</sup>	-25,96 (0,72) <sup>A</sup>	0,06 (0,01) <sup>AB</sup>	0,8 (0,45) <sup>AB</sup>	13,50 (6,77) <sup>CD</sup>
	<i>S. georgicouncinata</i>	4	1,07 (0,33) <sup>A</sup>	-25,24 (0,40) <sup>AB</sup>	0,05 (0,01) <sup>A</sup>	0,21 (0,05) <sup>A</sup>	4,71 (0,79) <sup>AB</sup>
	<i>S. uncinata</i>	12	5,03 (3,89) <sup>BC</sup>	-24,26 (0,52) <sup>BCDE</sup>	0,07 (0,03) <sup>ABC</sup>	0,61 (0,57) <sup>AB</sup>	7,99 (3,70) <sup>BC</sup>
	<i>S. filaris</i>	4	2,50 (1,20) <sup>AB</sup>	-25,18 (0,36) <sup>ABC</sup>	0,05 (0,01) <sup>AB</sup>	0,52 (0,09) <sup>AB</sup>	10,33 (0,80) <sup>CD</sup>
	<i>S. saxicola</i>	1	1,93 (-) <sup>AB</sup>	-24,45 (-) <sup>ABCDE</sup>	0,06 (-) <sup>ABC</sup>	0,76 (-) <sup>ABC</sup>	12,67 (-) <sup>CD</sup>

## **6.9. CORRELACIÓN ESPECIE ESPECÍFICA ENTRE EL CONTENIDO DE NUTRIENTES ENCONTRADO EN LAS MUESTRAS VEGETALES Y SUS SUELOS ASOCIADOS**

Se obtuvieron datos completos (contenido foliar y de suelo de C y N) para 34 muestras. En general, tomando en cuenta las 34 muestras obtenidas sin separarlas por especie, no existe una correlación clara entre el contenido de C detectado en musgos y el contenido de C detectado en suelos acorde al índice de correlación de Pearson (figura 10A). Por el contrario, una correlación positiva fue detectada para los contenidos de N, observándose una tendencia al aumento de N contenido en el suelo, acorde a un mayor contenido de N en los musgos (figura 10B).





**Figura 10:** Gráfico de puntos entre el contenido foliar de y en el suelo de carbono (A, n= 34; Pearson  $r = 0,01$   $p = 0,938$ ) y de nitrógeno (B, n=34; Pearson  $r = 0,4$   $p = 0,020$ ). Los símbolos representan la especie de la cual se obtuvieron los datos.

De manera especie específica, se detectaron diferentes valores para la correlación de Pearson y de Spearman (tabla 5), entre el contenido de C y N foliar y de suelo, aunque ninguna de ellas resultó significativa ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabla 5:** Valores obtenidos para los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman entre los contenidos foliares y en suelo de C y N para cada especie. Se muestra la cantidad de muestras (n) involucradas en cada correlación realizada. Ninguna de las correlaciones resultó significativa, con  $P < 0,05$ , por lo que no se presentan esos valores.

Especie	n	Pearson r %C	Spearman $\rho$ %C	Pearson r %N	Spearman $\rho$ %N
<i>B. austrosalebrosus</i>	2	-	-	-	-
<i>B. orbiculatifolium</i>	2	-	-	-	-
<i>B. patens</i>	3	0,50	0,50	-0,76	-0,87
<i>B. pseudotriquetrum</i>	6	0,73	0,77	0,25	0,52
<i>P. alpinum</i>	7	0,15	0,43	-0,05	-0,06
<i>S. filaris</i>	3	-0,45	-0,50	-0,75	-0,87
<i>S. georgicouncinata</i>	3	0,70	0,50	0,97	0,87
<i>S. uncinata</i>	8	-0,27	0,16	0,30	0,10

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1. VEGETACIÓN EN ISLA DECEPCIÓN

Un total de diez especies de musgos fueron registradas en este trabajo (tabla 1), las cuales habían sido registradas anteriormente en la isla. Acorde a Ochyra et al. (2008), ninguna de estas especies es exclusivamente antártica, además, ocho de ellas son bastante recurrentes en diferentes zonas de la península, con una relativamente alta cantidad de registros en la antártica marítima, por lo que no es de extrañar haberlas registrado en el transecto de trabajo. Las dos especies restantes corresponden a 1) *S. saxicola*, la cual posee una distribución antártica restringida a la zona norte de la península y a algunas islas subantárticas (Ochyra et al. 2008), y 2) *B. orbiculatifolium*, la cual ha sido registrada en cuatro islas subantárticas, en Isla Rey Jorge (Câmara et al. 2017), en Isla Nelson (Pereira & Putzke 2013), en Isla Elefante (Pereira & Putzke 2013), en Tierra de la Reina Maud (Ochyra & Singh 2008), y en dos sitios en la Isla Decepción (Ochyra et al. 2008; Pertierra et al. 2017), teniendo así sólo cinco localidades registradas en la Antártica. Esta última especie posee especial interés porque ha sido catalogada como una especie muy rara en ecosistemas antárticos (Ochyra et al. 2008; Pertierra et al. 2017), y sus registros en la Isla Decepción están restringidos a zonas de actividad geotérmica, los cuales a su vez corresponden a zonas ZAEP (Zona Antártica Especialmente Protegida) (Pertierra et al. 2017). El hallazgo realizado en este trabajo amplía la cantidad de registros para esta especie, añadiendo un nuevo sitio de registro en la Isla Decepción, destacándose por no

ser una zona protegida. Respecto a esto, *B. orbiculatifolium* fue colectada en S1, el sitio más cercano a la pingüinera, y caracterizado por poseer una mayor abundancia de *P. alpinum*, así como una alta presencia de algas verdes (*P. crispera*). Si bien el sustrato de este sitio concuerda con el descrito por Ochyra et al. (2008) para esta especie, llama la atención la ausencia de actividad geotérmica en este lugar, lo que va en discordancia con los otros registros de esta especie en la isla. Es importante destacar también que *B. orbiculatifolium* es una especie poco conocida, y probablemente no ha sido colectada en todos los sitios donde habita dentro de su amplio rango geográfico (Ochyra et al. 2008). Además, al igual que muchas otras especies de musgos, es probable que sea altamente vulnerable al pisoteo (Pertierra et al. 2013), por lo que conocer acerca de su presencia fuera de las zonas ZAEP, y alejada de las zonas de principal actividad geotérmica en la Isla Decepción, permitiría obtener nueva información de esta especie de ser estudiada en este sitio. Por ende, se sugiere tanto la evaluación de las características del sustrato en el sitio del hallazgo, como la visibilización de este registro, con el fin de evitar una accidental destrucción del individuo detectado.

Finalmente, otro importante aporte obtenido de este trabajo, corresponde a los primeros mapas de vegetación realizados para este sector de la Isla, el cual es usualmente concurrido debido a su fácil acceso, ya que no es una zona ZAEP, y la gran cantidad de trabajos que se desarrollan en la pingüinera. Obtener dichos mapas, podría ser el primer paso a generar planes de manejo en caso de ser

necesario. Por otro lado, permiten el monitoreo de la vegetación, siendo esta actual extensión de los tapetes de musgos un parámetro comparable a largo plazo.

## **7.2. EFECTO Y ALCANCE DEL NITRÓGENO APORTADO POR LA PINGÜINERA**

Contrario a lo planteado en la hipótesis, no existió un aumento en el valor de la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en los musgos a lo largo del transecto. Grime (1979) plantea que debido al carácter no vascular de los musgos, el valor de la firma  $\delta^{15}\text{N}$  foliar será similar al valor atmosférico circundante. Por ende, la ausencia de diferencias significativas para este isótopo entre los musgos, tanto agrupados por sector como por sitio, sugiere que la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en el aire es bastante estable a lo largo de todo el transecto, lo que a su vez implica una influencia animal generalizada en un transecto de alrededor de 2km.

Esto entra en contraste con el trabajo realizado por Skinner et al. (2006) en granjas ganaderas, donde la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en el aire (y de manera acorde en los musgos) presentó valores más negativos cerca de la fuente de emisión (los cuales a su vez fueron más negativos en comparación a los obtenidos en este trabajo) y aumentó conforme la distancia se hizo mayor. Cabe destacar además, que dicho gradiente fue observado en un área muchísimo más pequeña que la de este transecto, debido a que el alcance del  $\text{NH}_3$  volatilizado es relativamente

bajo, volviendo casi en su totalidad a depositarse en el suelo en un radio de 300m desde la fuente de origen.

Asumiendo entonces que los musgos poseen cantidades de N foliar correlacionadas con la cantidad de N depositado (Harmens et al. 2011), y una firma de  $\delta^{15}\text{N}$  similar a la de su ambiente inmediato (Grime 1979, Skinner et al. 2006), una posible explicación a esta ausencia de diferencias en la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en todo el transecto, que implicaría una influencia animal en toda el área, recae en dos factores: 1) la temperatura del sitio de trabajo; se ha reportado que la volatilización del amonio disminuye drásticamente a temperaturas de 5 °C o menos, volatilizándose menos del 10% del N suministrado en el sustrato (He et al. 1999). Esta reducida liberación de N, especialmente de  $^{14}\text{N}$ , el cual se volatiliza con mayor facilidad en comparación al  $^{15}\text{N}$  (Heaton 1986), estaría propiciando valores negativos en la firma, aunque en un rango menor al observado a mayores temperaturas. Y 2) la presencia de nidos de skúa en los tres sectores alejados de la pingüinera (P, G, e Irizar), los cuales podrían estar funcionando como fuente de N, y modificando la firma  $\delta^{15}\text{N}$  del aire en estos sitios, haciendo que esta sea más negativa en comparación a lo esperado debido a la distancia de la pingüinera. De esta forma, la diferencia entre los valores de la firma  $\delta^{15}\text{N}$  en la pingüinera y en el resto del transecto sería menor. Con esto es posible concluir que los musgos efectivamente están captando el N derivado de la volatilización de nutrientes desde los desechos orgánicos animales, pero que en las zonas

interiores de la isla, alejadas de la pingüinera, las Skúas juegan un rol tan notorio como el de los pingüinos en el aporte de nutrientes en los sitios que habitan.

Los datos obtenidos para la firma de  $\delta^{15}\text{N}$  en el suelo (figura 6B) concuerdan con lo anterior; valores más positivos fueron obtenidos cerca de la pingüinera, con una disminución a medida que la distancia aumenta. Ya que el  $\delta^{15}\text{N}$  preferentemente se retiene más tiempo en el suelo (usualmente como  $\text{NH}_4^+$ ) en vez de volatilizarse, esto representa una disminución en la cantidad de desechos orgánicos animales depositados en el suelo conforme la distancia desde la pingüinera aumenta. Lo cual queda corroborado en los resultados observados en la figura 4B, donde se detectó una menor cantidad de N contenido en el sustrato obtenido debajo de los musgos. En este caso, el contenido inusualmente alto de N observado en las muestras de suelo derivadas de la pingüinera sería causado por la alta cantidad de desechos orgánicos encontrados en el sustrato. Schnug et al. (2018) describe que el guano contiene nitrógeno en porcentajes desde un solo dígito hasta bajos valores de dos dígitos, dando como ejemplo porcentajes de 11 a 17% de N en guano derivado de colonias de aves en Perú. Por otro lado, la casi nula presencia de N en el resto de los suelos no es de extrañar. Bockheim (2015) menciona diferentes resultados de análisis químicos del suelo en distintas islas de la península antártica, observándose por ejemplo porcentajes de nitrógeno que fluctúan entre 0,07% y 0,15% en las muestras obtenidas de profundidades de 0 a 5 cm en Llano Point en la Isla Rey Jorge. Finalmente, y en concordancia a la cantidad de N detectada en el suelo en este estudio,

Santamans et al. (2017), en muestras de 10 a 15 cm de profundidad, cuantificó un promedio de  $3,88\% \pm 1,9$  de contenido de N en muestras de suelo inmersas en la pingüinera de Bahía Descubierta, y un promedio de  $0,26\% \pm 0,18$  en muestras obtenidas en la zona de Collado Vapor, lo cual se asemeja bastante a lo aquí reportado.

De esta forma, queda corroborado que el nitrógeno encontrado en los musgos y en el suelo deriva de la pingüinera en los sitios asociados a esta. Por otro lado, en las zonas más alejadas, las skúas estarían cumpliendo el rol de aportar nutrientes al ambiente, observable además en la figura 4A, donde se muestra que no existieron diferencias significativas en la cantidad promedio de N contenido en los musgos por sector, aunque si una pequeña tendencia a la disminución. A causa de la presencia de las skúas y su influencia en sobre los musgos, no fue posible determinar el alcance del N derivado de la pingüinera, aunque presumiblemente, debido a la larga distancia, la reducida volatilización de  $\text{NH}_3$ , y la alta pendiente que existe antes de llegar a las zonas interiores de la isla (por ejemplo sitios G o sitios Irizar), dicha influencia sea local, alcanzando únicamente los sitios S.

Cabe destacar, las skúas avistadas anidando durante esta campaña, correspondieron a individuos de *Stercorarius antarcticus lonnbergi* Mathews comúnmente llamada Skúa antártica café. Acorde a las observaciones realizadas por Burton (1968), esta especie anida en los territorios que suele utilizar para

descansar, los cuales se caracterizan principalmente por ser sitios despejados, usualmente planos o levemente inclinados, con una buena visibilidad de su territorio, el cual puede abarcar varios metros cuadrados. Además, las skúas suelen retornar cada año al mismo sitio donde anidó el anterior, haciendo variar la posición del nido unos pocos metros. Durante la fecha de crianza, las skúas cuidan de su cría, la cual se mueve por el territorio, aun sin volar. Para esto, se turnan las tareas de mantener vigilancia sobre el polluelo y el territorio, y de ir en busca de alimento.

Así, este hábito territorial, y con continua influencia de estas aves, es la que propicia una acumulación de nutrientes en el sitio de anidamiento, que usualmente se encuentra cerca de tapetes de musgos, los cuales también son utilizados en la construcción del nido.

### **7.3. DIFERENCIAS ESPECIE-ESPECÍFICAS**

Ninguna especie estuvo presente a lo largo de todo el transecto, e incluso algunas fueron registradas en un solo punto de muestreo. Esto no permite discriminar si las diferencias detectadas en la cantidad de nutrientes contenidos en las muestras foliares y de su sustrato se deben a la biología misma de cada musgo, o a su posición en el transecto. Aun así, la mayoría de ellas presentó un porcentaje de N foliar similar, demostrando una acumulación similar de este nutriente en los tejidos. La excepción a esto fueron *P. alpinum*, el musgo con

menor acumulación de N, y por el contrario, *B. orbiculatifolium*, especie que acumula significativamente más N.

A priori, estas diferencias parecen bastante relevantes, más aun considerando el popular uso de los musgos como indicadores de las cantidades de N ambiental depositado (Zechmeister et al. 2008), sugiriendo que distintas especies podrían ser más o menos precisas para esta tarea. Aun así, la variable presencia de los musgos en los sitios, no permite descartar que dichas diferencias se deban al efecto producido por la cercanía con la pingüinera. En este sentido, *B. orbiculatifolium*, sólo fue observado y colectado en S1, el sitio de muestreo más cercano a las colonias de pingüinos, y su contenido de N es relativamente similar al de las otras muestras colectadas en ese sitio (las cuales fluctúan desde 2,28 hasta 4,03). Por otro lado, el caso de *P. alpinum* resulta más curioso, debido a que no presentó diferencias significativas a lo largo del transecto, en los sitios donde fue detectado (Kruskal-Wallis,  $p= 0,1906$ ,  $n= 24$ ). Nuevamente, resulta difícil determinar si dicha estabilidad se debe a alguna característica biológica, puesto que no fue registrado en S1 o S2 (los sitios más cercanos a la pingüinera), aunque considerando la capacidad de esta especie de obtener N desde el suelo a través de conductos llamados hidroides (Ayres, 2006), y la capa de cera que recubre sus hojas (Clayton-Greene et al. 1985), capaz de repeler el agua y la radiación UV (Huttunen & Virtanen 2004), es posible que esta especie sea efectivamente capaz de regular la absorción de N independientemente de la

deposición ambiental de este nutriente, lo que la volvería un mal bioindicador para este caso.

En términos de incorporación de nutrientes al sustrato, se sabe que la descomposición de los musgos es bastante lenta, y resulta en la acumulación de materia orgánica bajo los brotes vivos (Davis 1986). Cuantitativamente, Davis (1986) describe pérdidas de un 2 a 3% en el peso del sustrato orgánico luego de 2 años. Esto dificulta determinar el aporte de nutrientes especie específico de forma cuantitativa, más aun al observar los resultados obtenidos, que reflejaron rangos de C y N (%) bastante acotados en el sustrato. Además, en ninguna de las especie se observaron correlaciones significativas entre el contenido foliar y el contenido en sustrato para ambos nutrientes, aunque independiente a esto, las especies mostraron diferentes comportamientos en este sentido, observándose incluso correlaciones negativas. A nivel general, el C no mostró indicios de la existencia de una correlación entre ambas variables. De forma contraria, el contenido de N en el suelo sí mostró una significativa tendencia al aumento respecto al aumento del N en los musgos. Esto tiene sentido debido a que, como se mencionó anteriormente, los musgos en general son buenos indicadores de la deposición de N, por lo que es de esperar que un mayor contenido de N en los musgos, refleje una mayor cantidad de N depositado en el suelo (aunque este no provenga directamente de ellos).

Una opción viable para generar inferencias acerca de la influencia de los musgos en el ciclaje de nutrientes recae en considerar las características biológicas de cada especie. Ochyra et al. (2008) describe acerca de las especies observadas en este trabajo, que la mayoría son cosmopolitas, con amplios rangos de distribución antártica y poca especificidad en los requerimientos físicos de su hábitat (como el sustrato, la exposición, humedad), lo que además significa distintas formas de crecimiento y tamaños que alcanza a desarrollar cada musgo. En el transecto estudiado, las especies con una mayor cobertura en los sitios con vegetación correspondieron a *P. alpinum* y *S. uncinata*, quedando el resto de las especies relegadas a pequeños espacios entre los cojines y tapetes formados por estas especies. Para el C, estas dos especies presentaron coeficientes de correlación muy cercanos a cero, sugiriendo que no existe una efectiva incorporación de nutrientes al sustrato. Esto implica que la cantidad de carbono que se integra al sustrato es, al menos hasta cierto punto, independiente de la cantidad de C contenido en los musgos, lo cual se explica por la reducida degradación de los tejidos orgánicos. De hecho, Selby (1989) concluye que si bien los suelos antárticos no están completamente desprovistos de vida, la influencia de la materia viva en el desarrollo de este es casi completamente insignificante. Además, el suelo reciente de la Isla Decepción, y su composición principalmente piroclástica podría afectar la retención del C en el suelo, sobre todo considerando el constante flujo de agua derivado del derretimiento de nieve. Debido a lo anterior, determinar la incorporación especie específica de C en el

sustrato requiere de una diferente metodología de trabajo, que sea capaz de determinar la descomposición a lo largo de los años sin que las características ambientales modifiquen el contenido de C en el suelo.



## 8. CONCLUSIONES

Con un total de diez especies registradas, se destaca enormemente la gran abundancia y cobertura de *P. alpinum* y *S. uncinata* en todo el transecto, siendo el resto de las especies detectadas entre estos parches vegetacionales. Por otro lado el nuevo registro realizado para *B. orbiculatifolium* invita a realizar nuevas investigaciones en torno a esta poco abundante especie, ampliando a tres el número de sitios en los que esta especie habita en la Isla Decepción.

Por primera vez son realizados mapas de vegetación en este sector de la Isla Decepción, y se espera de ellos un uso adecuado en la visibilización de la vegetación, así como poder darle diversas utilidades en posteriores trabajos.

A pesar de que no pudo ser detectado el alcance en específico, los nutrientes aportados por las pingüineras son la principal fuente de N captado por los musgos que habitan en las cercanías, los cuales estarían recibiendo este nutriente desde la volatilización de los desechos orgánicos producidos por los pingüinos.

Por otro lado, en las zonas interiores de las islas, las skúas serían las encargadas de cumplir este rol en el aporte de nutrientes para la vegetación circundante.

No fue posible determinar diferencias especie-específicas en la incorporación de C desde el musgo hacia el sustrato en este trabajo, aunque las diferentes abundancias y biología de las especies sugieren un diferente rol en estos procesos. Sin embargo, la bajísima tasa de descomposición debido a las bajas temperatura no permite su fácil identificación, e implica además que el rol

cumplido por la especie también depende de su abundancia en la comunidad local.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

AYRES, E., VAN DER WAL, R., SOMMERKORN, M., & BARDGETT, R. D. 2006. Direct uptake of soil nitrogen by mosses. *Biology Letters* 2(2):286–288.

BANERGEER, R.D. & SEN, S.P. 1979. Antibiotic activity of bryophytes. *Bryologist* 82:141–153.

BARBOSA, A., MORENO, J., POTTI, J. & MERINO, S. 1997. Breeding group size, nest position and breeding success in the Chinstrap Penguin. *Polar Biology* 18(6):410-414.

BEYER, L., & BÖLTER, M. (Eds.). 2002. *Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Ecological Studies. 429 pp.

BOCKHEIM, J. (Ed) 2015. *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. 322 pp.

BOKHORST, S., CONVEY, P., & AERTS, R. 2019. Nitrogen Inputs by Marine Vertebrates Drive Abundance and Richness in Antarctic Terrestrial Ecosystems. *Current Biology* 29(10):1721–1727.

BOKHORST, S., HUISKES, A., CONVEY, P. & AERTS, R. 2007. External nutrient inputs into terrestrial ecosystems of the Falkland Islands and the Maritime Antarctic region. *Polar Biology* 30(10):1315-1321.

BÖLTER, M. 2011. Soil development and soil biology on King George Island, Maritime Antarctic. *Polish Polar Research* 32(2):105-116.

BURTON, R.W. 1968 Breeding biology of the brown skua, *Catharacta skua lonnbergi* (Mathews), at Signy Island, South Orkney Islands. *British Antarctic Survey Bulletin*, 15:9-28.

CALLAGHAN, T.V., COLLINS, N.J. 1981. Life cycles, population dynamics, and the growth of tundra plants. En: Tundra ecosystems: a comparative analysis (Eds. Bliss, L.C., Heal, O.W. & Moore, J.J.), pp. 257–284. Cambridge University Press. Cambridge.

CÂMARA, P., SILVA, B., CARVALHO, M.S. & HENRIQUES, D. 2017. The moss flora of Ostrov Geologov (Geologists Island), Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 52(2):251-255.

CASANOVA-KATNY, A. & CAVIERES, L. 2012. Antarctic moss carpets facilitate growth of *Deschampsia antarctica* but not its survival. Polar Biology. 35(12):1869-1878.

CLAYTON-GREENE, K.A., COLLINS, N.J., GREEN, T.G.A., & PROCTOR, M.C.F. 1985. Surface wax, structure and function in leaves of Polytrichaceae. Journal of Bryology 13(4):549–562.

COLLINS, N. 1973. Productivity of selected bryophyte communities in the maritime Antarctic. En: Primary production and production processes, tundra biome (Eds. Bliss, L.C. & Wielgolaski, F.E.), pp. 177-183. University of Alberta Printing Services, Edmonton.

CONVEY, P. 2005. Antarctic terrestrial ecosystems: responses to environmental change. Polarforschung 75(2-3):101–111.

CONVEY, P., CHOWN, S.L., CLARKE, A., BARNES, D.K.A., BOKHORST, S., CUMMINGS, V., DUCKLOW, H.W., FRATI, F., GREEN, T.G.A., GORDON, S., GRIFFITHS, H.J., HOWARD-WILLIAMS, C., HUISKES, A.H.L., LAYBOURN-PARRY, J., LYONS, W.B., MCMINN, A., MORLEY, S.A., PECK, L.S., QUESADA, A., ROBINSON, S.A., SCHIAPARELLI, S. & WALL, D.H. 2014. The spatial structure of Antarctic biodiversity. Ecological Monographs 84(2):203-244.

DAVIS, R. C. 1986. Environmental factors influencing decomposition rates in two Antarctic moss communities. Polar Biology 5(2):95–103.

DAWSON, T., MAMBELLI, S., PLAMBOECK, A., TEMPLER, P. & TU, K. 2002. Stable Isotopes in Plant Ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33(1):507–59.

FENTON, J.H.C. 1978. The growth of Antarctic moss-peat banks. PhD Thesis, University of London (Westfield College). London. England.

FENTON, J.H.C. 1980. The Rate of Peat Accumulation in Antarctic Moss Banks. *The Journal of Ecology*, 68(1):211-228.

GREENFIELD, L.G. 1992. Precipitation nitrogen at Maritime Signy Island and Continental Cape-Bird, Antarctica. *Polar Biology* 11:649–653.

GRIME, J.P. 1979. *Plant Strategies and Vegetation Processes*, John Wiley & Sons Ltd. Chichester. 222 pp.

HARMENS, H., NORRIS, D., COOPER, D., MILLS, G., STEINNES, E., KUBIN, E., THÖNI, L., ABOAL, J., ALBER, R., CARBALLEIRA, A., COSKUN, M., TEMMERMAN, L., FROLOVA, M., GONZÁLEZ-MIQUEO, L., JERAN, Z., LEBLOND, S., LIIV, S., MAŇKOVSKÁ, B., PESCH, R. & ZECHMEISTER, H. 2011. Nitrogen concentrations in mosses indicate the spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition in Europe. *Environmental pollution* 159(10):2852-60.

HE, Z., KUMAR, A., CALVERT, D. & BANKS, D. 1999. Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH. *Soil Science*. 164(10). 750-758.

HEATON, T.H.E. 1986. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 59(10), 87–102.

HUTTUMEN, S. & VIRTANEN, V. 2004. Wax and UV-B-absorbing compounds of *Polytrichastrum alpinum* from different climatic regions. En: *Proceedings of the*

IUFRO meeting. Forest under Climate Change, Enhanced UV and Air Pollution, pp. 17-21. Oulu, Finland.

KOHL, D.H., SHEARER, G.B. & COMMONER, B. 1973. Variation of  $^{15}\text{N}$  in corn and soil following application of fertilizer nitrogen. Soil Science Society of America Proceedings 37(6):888-892.

LEWIS, S. 1988. Recording bryophyte microclimates in remote and severe environments. En: Methods in bryology (Ed. Glime J.M.), pp. 275-284. Hattori Botanical Laboratory. Nichinan.

LONGTON, R.E. 1972. Growth and reproduction of northern and southern hemisphere populations of the peat forming moss *Polytrichum alpestre* with reference to the estimation of productivity. Proceedings of 4<sup>th</sup> International Peat Congress I-IV, Helsinki, 1972:259-275.

LONGTON, R.E. 1974. Microclimate and Biomass in Communities of the *Bryum* Association on Ross Island, Continental Antarctica. The Bryologist 77(2):109-127.

LONGTON, R.E. 1979. Studies on growth, reproduction and population ecology in relation to microclimate in the bipolar moss *Polytrichum alpestre*. The Bryologist 82(3):325-367.

MATEO M.A., FERRIO J.P., & ARAUS J.L. 2004. Isótopos estables en fisiología vegetal. In: La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis (Eds. Reigosa, M.J., Pedrol, N. & Sánchez, A.), pp 113-160. Paraninfo, S.A. Madrid.

NAVEEN, R., LYNCH, H., FORREST, S., MUELLER, T. & POLITO, M. 2012. First direct, site-wide penguin survey at Deception Island, Antarctica, suggests significant declines in breeding chinstrap penguins. Polar Biology. 35(12):1879-1888.

OCHYRA, R., LEWIS-SMITH, R. & BEDNAREK-OCHYRA H. 2008. The Illustrated Moss Flora of Antarctica. Cambridge University Press. Cambridge. 704 pp.

OCHYRA, R., & SINGH, S. M. 2008. Three remarkable moss records from Dronning Maud Land, continental Antarctica. *Nova Hedwigia* 86(3):497–506.

OLIVER, M.V., VELTEN, J. & MISHLER, B.D. 2005. Desiccation tolerance in bryophytes: a reflection of the primitive strategy for plant survival in dehydrating habitats?. *Integrative and Comparative Biology* 45(5):788–99.

OTERO, X., DE LA PEÑA LASTRA, S., PÉREZ-ALBERTI, A., FERREIRA, T. & HUERTA-DIAZ, M. 2018. Seabird colonies as important global drivers in the nitrogen and phosphorus cycles. *Nature Communications* 9(1).

PALLAS, R., SMELLIE, J.L., CASAS, J.M. & CALVET, J. 2001. Using tephrochronology to date temperate ice: correlation between ice tephra on Livingston Island and eruptive units on Deception Island volcano (South Shetland Islands, Antarctica). *Holocene* 11(2):149–160.

PEREIRA, A.B. & PUTZKE, J. 2013. The Brazilian research contribution to knowledge of the plant communities from Antarctic ice free areas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 85(3):923-935.

PERTIERRA, L., LARA, F., TEJEDO, P., QUESADA, A., & BENAYAS, J. 2013. Rapid denudation processes in cryptogamic communities from Maritime Antarctica subjected to human trampling. *Antarctic Science* 25(2):318-328.

PERTIERRA, L. R., LARA, F., BENAYAS, J., LEWIS-SMITH, R. I., & HUGHES, K. A. 2017. Conflicting science requirements impact on rare moss conservation measures. *Antarctic Science* 30(1):13–21.

PRATHER, H., CASANOVA-KATNY, A., CLEMENTS, A., CHMIELEWSKI, M., BALKAN, M., SHORTLIDGE, E., ROSENSTIEL, T. & EPPLEY, S. 2019. Species-specific effects of passive warming in an Antarctic moss system. *Royal Society Open Science* 6(11).

PROCTOR, M.C.F. 2000. Mosses and alternative adaptation to life on land. *New Phytologist* 148(1):1–3.

ROBINSON, S., WASLEY, J., POPP, M. & LOVELOCK, C. 2000. Desiccation tolerance of three moss species from continental Antarctica. *Australian journal of plant physiology* 27(5).

ROBINSON D. 2001.  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology & Evolution* 16(3):153–162.

ROBINSON, S., KING, D., BRAMLEY-ALVES, J., WATERMAN, M., ASHCROFT, M., WASLEY, J., TURNBULL, J., MILLER, R., RYAN-COLTON, E., BENNY, T., MULLANY, K., CLARKE, L., BARRY, L. & HUA, Q. 2018. Rapid change in East Antarctic terrestrial vegetation in response to regional drying. *Nature Climate Change* 8(10):879–884.

SANTAMANS, A. C., BOLUDA, R., PICAZO, A., GIL, C., RAMOS-MIRAS, J., TEJEDO, P., PERTIERRA, L. R., BENAYAS, J., & CAMACHO, A. 2017. Soil features in rookeries of Antarctic penguins reveal sea to land biotransport of chemical pollutants. *PLoS one*, 12(8), e0181901.

SCHNUG, E., JACOBS, F. & STÖVEN, K. 2018. Guano: The White Gold of the Seabirds. En: *Seabirds* (Ed. Mikkola, H.). University of Eastern Finland.

SCHWARTZMAN, D. 1999. *Life, Temperature, and the Earth*. Columbia University Press. New York. 272 pp.

SELBY, M.J. (1989), Antarctica: Soils, weathering processes and environment. En: *Developments in soil science 16* (Eds. Campbell I.B. & Claridge G.G.C.), Elsevier, Amsterdam, 1987. No. of pages: 368. *Earth Surf. Process. Landforms*, 14: 753-754.

SHEARER, G., KOHL, D.H. & CHIEN, S.H. 1978. The nitrogen-15 abundance in a wide variety of soils. *Soil Science Society of America Journal* 42(6):899-902.

SIMAS, F., SCHAEFER, C., MELO, V., FILHO, M., MICHEL, R., PEREIRA, V., GOMES, M. & COSTA, L. 2007. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: Phosphatization as a soil forming process. *Geoderma*. 138(3-4):191–203.

SIMONOV, I.M. 1977. Physical geographic description of Fildes Peninsula (South Shetland Islands). *Polar Geography* 1(3):223–242.

SKINNER, R.A., INESON, P., JONES, H., SLEEP, D. AND RANK, R. 2006. Using  $\delta^{15}\text{N}$  values to characterise the nitrogen nutrient pathways from intensive animal units. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20(19):2858-2864.

SMELLIE, J.L. 2002. Geology. En: *Geology and geomorphology of Deception Island*, pp 11–30. British Antarctic Survey BAS GEOMAP Series, Cambridge.

SMITH, A.J.E. 1982. Epiphytes and epiliths. En: *Bryophyte ecology* (Ed. Smith, A.J.E.), pp. 191–227. Chapman & Hall, London.

USHER, M. & G. BOOTH, R. 1984. Arthropod Communities in a Maritime Antarctic Moss-Turf Habitat: Three-Dimensional Distribution of Mites and Collembola. *The Journal of Animal Ecology* 53(2):427-441.

WADA, E., TERAZAKI, M., KABAYA, Y., & NEMOTO, T. 1987.  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  abundances in the Antarctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 34(5-6):829–841.

WASLEY, J., ROBINSON, S., LOVELOCK, C. & POPP, M. 2006. Some like it wet - Biological characteristics underpinning tolerance of extreme water stress events in Antarctic bryophytes. *Functional Plant Biology* 33(5):443-455.

WILLIAMS, T.D. 1995. *The penguins*. Oxford University Press, Oxford.

ZÚÑIGA-GONZÁLEZ, P., ZÚÑIGA, G. E., PIZARRO, M., & CASANOVA-KATNY, A. 2016. Soluble carbohydrate content variation in *Sanionia uncinata* and *Polytrichastrum alpinum*, two Antarctic mosses with contrasting desiccation capacities. *Biological research* 49, 6.

ZECHMEISTER, H. G., RICHTER, A., SMIDT, S., HOHENWALLNER, D., RODER, I., MARINGER, S., & WANEK, W. 2008. Total Nitrogen Content and  $\delta^{15}\text{N}$  Signatures in Moss Tissue: Indicative Value for Nitrogen Deposition Patterns and Source Allocation on a Nationwide Scale. *Environmental Science & Technology* 42(23):8661–8667.

ZWOLICKI, A., BARCIKOWSKI, M., BARCIKOWSKI, A., CYMERSKI, M., STEMPNIWICZ, L. & CONVEY, P. (2015). Seabird colony effects on soil properties and vegetation zonation patterns on King George Island, Maritime Antarctic. *Polar Biology* 38(10):1645-1655.

