

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE FORMAS DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN SUELOS DE LAS COLONIAS DE GAVIOTA PATIAMARILLA (*LARUS MICHAEHELLIS*, NAUMANN 1840) EN EL PARQUE NACIONAL MARÍTIMO-TERRESTRE DE LAS ISLAS ATLÁNTICAS DE GALICIA

X. L. OTERO ; S. DE LA PEÑA-LASTRA¹, A. PÉREZ-ALBERTI², F. MACÍAS¹

RESUMEN

Se llevó a cabo un intenso programa de seguimiento ambiental en las colonias de gaviota patiamarilla con el objetivo de evaluar su incidencia sobre la vegetación, suelos y aguas del Parque Nacional. El seguimiento se realizó durante el periodo comprendido entre enero de 2011 hasta diciembre de 2014, con una frecuencia de muestreo aproximada de 4 meses para suelos y aguas costeras, pero más intensivo para las aguas de lluvia. Se realizaron análisis de suelos, aguas de lluvia, aguas de escorrentía y regatos de Cíes y Ons y aguas costeras. Asimismo, también se analizaron diferentes tipos de biomateriales generados por la gaviota (excrementos, plumas, egagrópilas y huevos). En el presente trabajo se muestran los resultados relativos a la dinámica del nitrógeno y fósforo en los suelos de las colonias de gaviota patiamarilla. Las muestras de suelos se tomaron en parcelas permanentes ubicadas en diferentes comunidades vegetales.

Los excrementos de gaviota patiamarilla presentaron un alto contenido de nitrógeno total (NT) que osciló entre 0,7 y 16%, de los cuales 2000-3000 mg kg⁻¹ corresponden a formas inorgánicas asimilables directamente por las plantas (N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺). La concentración de P total en los excrementos de gaviota fue también muy elevada pero inferior al N total (P total 31721 mg kg⁻¹).

Los resultados obtenidos a partir de un modelo bioenergético indican que anualmente se deposita en el conjunto del Parque 45,37 t de N y 7,56 t de P que le confiere a los suelos de las colonias una concentración muy superior a la obtenida para la zona control. No obstante la dinámica estacional del N y P en los suelos es netamente diferente. Así, se ha observado que en los suelos de la colonia, el contenido de las formas de P fue significativamente superior tanto en verano como en invierno, mientras que las formas de N sólo lo fueron en verano. La nitrificación junto con la naturaleza arenosa de los suelos y la elevada precipitación que se concentra a finales de otoño favorecen el lixiviado de las formas inorgánicas de N. El fraccionamiento del P puso de manifiesto que la forma dominante es el P apatito, seguido del P residual; mientras que el P asociado a los óxidos e hidróxidos de Fe fue una fracción minoritaria, lo cual está de acuerdo con el bajo contenido en Fe soluble en oxalato de amonio.

Palabras clave: colonia de gaviota, suelo, nutrientes, nitrógeno, fósforo

¹ Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultade de Bioloxía, Universidade de Santiago de Compostela. Galicia. Spain.

² Departamento de Xeografía, Facultade de Xeografía, Universidade de Santiago de Compostela. Galicia. Spain.

SUMMARY

An intensive program of environmental monitoring was carried out in the yellow-legged gull colonies in order to assess its impact on vegetation, soil and water of the National Park. The monitoring was conducted during the period January 2011 to December 2014, with a sampling frequency of about 4 months for soil and coastal waters, but more intensive for the rainwater. Soil testing, rainwater, runoff and pools of Cies and Ons and coastal waters were analysed. Also, different types of biomaterials generated by gull (droppings, feathers, pellets and eggs) were also analysed. In this paper, the results on the dynamics of nitrogen and phosphorus in soils of yellow-legged gull colonies are presented. Soil samples were taken at permanent plots located in different plant communities.

Yellow-legged gull droppings had a high content of total nitrogen (TN) ranging between 0.7 and 16%, of which 2,000-3,000 mg kg⁻¹ are inorganic forms that are directly assimilated by plants (N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺). The concentration of total P in seagull droppings was also very high but less than the total N (P total: 31,721 mg kg⁻¹).

The results obtained from a model indicate that annual bioenergy is deposited throughout the park 45.37 t N and 7.56 t P which gives the soils colonies these nutrients to a concentration much higher than that obtained for the Control area. Despite the seasonal dynamics of N and P in soils it is clearly different. Thus, it has been observed that in the soils of the colony, the content of the forms of P was significantly higher in both summer and winter, while forms of N were only significantly in summer. Nitrification with the sandy nature of the soil and high rainfall is concentrated in late autumn favoured the leaching of inorganic forms of N, but not P. Regarding this last item, fractionation showed that P apatite was the dominant form, followed by the residual P; while the P associated with the oxides and hydroxides of Fe was very low, which agrees with the low-soluble Fe ammonium oxalate.

Keywords: seagull colony, soil, nutrients, nitrogen, phosphorus

INTRODUCCIÓN

En el Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia, se encuentra una de las mayores colonia de cría de gaviota patiamarilla (*Larus michahellis*) del mundo; al mismo tiempo en las colonias se encuentran especies de interés ambiental por ser endémicas, raras o amenazadas (p. ej. *Calendula suffruticosa* subsp. *algarbiensis*, *Angelica pachycarpa*, etc., GUITIÁN & GUITIÁN, 1990; BERNÁRDEZ *et al.*, 2011).

La flora aquí presente muestran adaptaciones específicas para poder tolerar las rigurosas condiciones ambientales como son los fuertes vientos, elevada salinidad, fuertes pendientes, suelos someros y arenosos (OTERO & PÉREZ-ALBERTI, 2009), dando lugar a bandas de vegetación más o

menos paralelas a la línea de costa. Sin embargo el espectacular incremento que en los últimos 30 años ha experimentado la colonia de gaviota patiamarilla en todos los archipiélagos que configuran el Parque Nacional ha modificado significativamente la composición florística en las zonas de cría (acantilados y dunas); de tal manera que algunos autores ya han descrito comunidades vegetales nuevas como *Cochleario-Matricarietum maritimae* de marcado carácter ornitocoprófilo (GUITIÁN & GUITIÁN, 1990).

No obstante, el conocimiento de las variables que controlan la distribución y dinámica de las comunidades vegetales y hábitats de los acantilados de Galicia es todavía poco conocido. Algunos autores han sugerido que el estudio de los procesos edáficos y biogeoquímicos es un conocimiento fundamental para determinar las causas del de-

clive de ciertos hábitats de interés ambiental como aquellas que recoge el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE; y éste debe ser un requisito básico a tener en consideración en las tareas de conservación y restauración (KLEIJN *et al.*, 2008, DE GRAAF *et al.*, 2009, WASSEN *et al.*, 2005); así como en la elaboración de los informes técnicos que los estados miembros deben remitir cada seis años a la Comisión de Medio Ambiente de la Unión Europea según recoge el artículo 17 de la propia Directiva 92/43/CEE.

Trabajos realizados en diferentes partes del mundo relacionan los cambios observados en la vegetación de las colonias de aves marinas con el incremento de nitrógeno en el suelo, derivado de la mineralización del ácido úrico presente en sus excrementos (SOBEY & KENWOERTHY, 1979, ANDERSON & POLIS, 1999, VIDAL *et al.*, 1998). Sin embargo, pocos consideran el papel del fósforo ni el ciclo biogeoquímico de estos elementos en relación con su biodisponibilidad (OTERO *et al.*, 2015). En el presente trabajo se muestran los resultados del seguimiento durante 3 años de la dinámica del N y P en suelos y aguas de las colonias de gaviota del Parque Nacional en comparación con una zona control. El muestreo de suelos se realizó en los meses de febrero, previo a la llegada de las gaviotas a la colonia; agosto, final de la época de cría y en diciembre, después de las fuertes precipitaciones de los meses de noviembre y diciembre. Además de la caracterización general de los suelos, se analizó el contenido total, asimilable por las plantas de N y P en excrementos y suelos, así como el fraccionamiento de las formas de P. Por último, se determinó también la concentración de estos elementos en el agua de lluvia y en el agua de escorrentía.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en los acantilados de los archipiélagos de las Islas Cíes y Ons, seleccionándose como zona control (sin presencia de gaviotas) los acantilados de cabo Home (Municipio de Cangas-Pontevedra) (Figura 1). Para todas las

zonas de estudio el sustrato geológico está constituido por granito de dos micas, la altura oscila entre los 10-30 m s.n.m. y la precipitación media registrada en la estación pluviométrica instalada en los acantilados de Figueiras (Islas Cíes) fue de 1419 mm (Figura 2). Esta precipitación representa casi el doble de la que habitualmente se considera para las islas Cíes (877 mm; CARBALLEIRA *et al.*, 1982).

Los acantilados han sido seleccionados en función de la distribución de las principales comunidades vegetales descritas en trabajos o informes previos (p. ej. ARCEA, 1999) y la densidad de gaviotas, según se indica en la Tabla 1. En este sentido, hay que destacar que la población nidificante de gaviota patiamarilla ha experimentado cambios notables en los últimos 35 años. Así, por ejemplo, el archipiélago de las Islas Cíes la población nidificante pasó de 4236 parejas en el año 1976 a 22220 parejas en el año 1991. Actual-

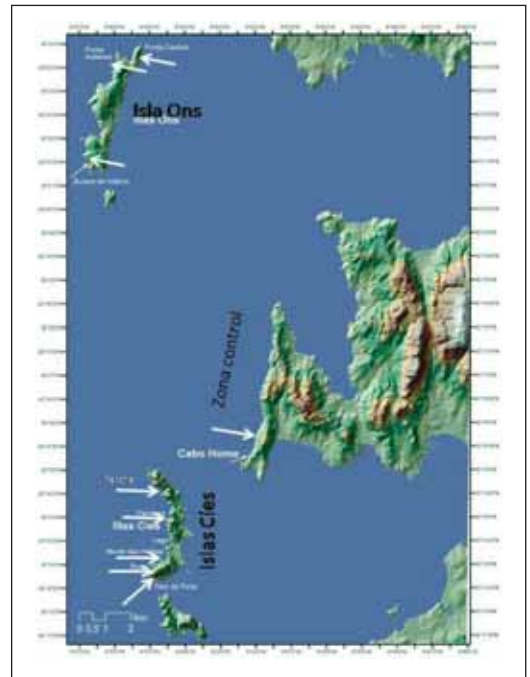


Figura 1. Localización de las parcelas permanentes en la zona control (cabo Home), archipiélago de las islas Cíes y Ons.

Figure 1. Location of permanent plots in the control site (Cabo Home), archipelago of Cíes and Ons islands.



Figura 2. Variación mensual de la precipitación en los acantilados de Figueiras y estación meteorológica del Parque Nacional en las islas Cíes.

Figure 2. Monthly variation of rainfall in Figueiras’s cliffs and the National Park weather station in Cíes’s Islands.

mente, el número de parejas reproductoras es netamente inferior censándose en el año 2011 un total de 7485 parejas (Tabla 1, PÉREZ *et al.*, 2012). En cuanto al archipiélago de Ons, el descenso no fue tan acusado como en las Islas Cíes, pasando de 892 parejas del año 1981/82 a 3747 en 1992 y descendiendo a 3254 en 2011 (Tabla 1).

Muestreo y análisis de suelos

El muestreo de suelos se llevó a cabo a lo largo de los años 2011, 2012 y 2013, en diferentes acantilados de las islas Cíes y Ons en donde se instalaron parcelas permanentes de aproximadamente 7 x 5 m. La toma de muestras se realizó en tres periodos diferentes de cada año: febrero-marzo, que corresponde con la llegada de las gaviotas a las colonias; agosto, que coincide con el final del periodo reproductivo y, por tanto, recoge el mayor impacto posible de las gaviotas sobre el suelo y por último, diciembre que, después de varios meses sin gaviotas en los acantilados y tras periodos de fuertes precipitaciones, representa la situación de menor influencia de las gaviotas sobre los

suelos. Para la toma de las muestras se utilizó una pala de mano y un cuadrado de 50 x 50 cm que se lanzó al azar en cada parcela entre 6 - 8 veces. En cada ubicación se realizó una descripción de la flora y se tomó una muestra de suelo.

Los análisis se realizaron en la fracción tierra fina (< 2 mm), determinándose en ellos: la granulometría según el método de la pipeta de Robinson; el pH en agua y KCl (0.01 M) en una relación 1:2,5 (BUURMAN *et al.*, 1996); el pH en NaF (1M) a pH 7,1-8,2 (FIELDES & PERROT, 1966); la conductividad eléctrica (CE) fue medida en una suspensión suelo agua (1:5); el C orgánico total (COT) y N total (NT) en un autoanizador Leco CNS1000 (tanto para excrementos como para los suelos); los cationes de intercambio (Ca, Mg, Na, K, Al) fueron extraídos con una disolución NH₄Cl 1M (PEECH *et al.*, 1947; BERTSCH & BLOOM, 1996). El amonio (NH₄⁺) intercambiable y nitrato (NO₃⁻) fueron extraídos a partir de 5 gramos de suelo húmedo y 50 ml de una disolución KCl 2 M (MULVANEY, 1996). La extracción de óxidos de Fe y Al de bajo orden de cristalinidad fue realizada con

Año	Monte Herbas	Faro da Porta	Campana	Ruzo	Figueiras	Percha	Total Cíes	Punta Centulo	Punta Xubenco	Total Ons	Referencia
1976	sd	sd	30	sd	45	260	4236	sd	sd	sd	BARCENA, 1977
1981	sd	295	489	309	300	1575	11441	201	39	892	BARCENA <i>et al.</i> , 1987
1986	sd	sd	sd	sd	sd	sd	12100	sd	sd	sd	BARCENA <i>et al.</i> , 1987
1991	72	735	526	933	344	1572	22220	sd	sd	3747	MUNILLA, 1997
1996	sd	sd	sd	sd	sd	sd	19388	165	sd	sd	ARCEA, 1996
2011	276	64	sd	54	85	558	7485	sd	218	3259	PEREZ <i>et al.</i> , 2012

Tabla 1. Variación de la población de gaviota patiamarilla en la zona de estudio en el periodo 1976-2011

oxalato de amonio (0,2M, pH 3) (HOLMGREN, 1967; BLAKEMORE, 1978; KUO, 1996). El fósforo total (PT) se obtuvo a partir de la muestra molida y tras un ataque con ácido nítrico y clorhídrico (9:3 v/v) concentrado en microondas, mientras que el fósforo asimilable (P-mehlich) fue extraído mediante el método Mehlich 3 (MEHLICH, 1984).

Finalmente, se llevó a cabo el fraccionamiento de las formas de fósforo separando las siguientes fracciones: 1) P-ads: P ligeramente adsorbido a los coloides del suelo, fue extraído con una disolución 1 M de MgCl₂ en agitación continua durante 30 min y, como en el resto de fases que se describen a continuación, centrifugado a 4000 rpm y fil-

Localidad	Coorden. UTM	Orientación	Formación vegetal	Especies más representativas	Actividad de las gaviotas
<i>Cabo Home (Zona Control)</i>					
<i>Cabo Home (CH)</i>	511270,408 4680186,325	W	Pastizales de Armeria pubigera	A. pubigera	Ausencia
<i>Islas Cíes</i>					
<i>Monte Herbas (MH)</i>	507595,772 4674540,514	N	Dauco gummnifer-Festucetum pruinosa	Festuca pruinosa	Zona recientemente colonizada
<i>Figeiras (FG1)</i>	507662,000 4675667,000	N-NO	Cochleario-Matricarietum maritimae	Cochlearia danica; Matricaria maritima	Zona de baja densidad en los años 80 e incremento en los últimos 15 años
<i>Figueiras (FG2)</i>	507663,946 4675668,334	W-SW	Praderas de Dactylis maritima y Silene uniflora	Silene uniflora; Dactylis glomerata	
<i>Faro Porta (FP1)</i>	507159,000 4673350,000	W	Pastizales de A. pubigera	A. pubigera	Zona de baja densidad
<i>Faro Porta (FP2)</i>	507120,000 4673364,000	S	Calendulo algarbiensis-Parietaria jundaicae	Calendula algarbiensis; Parietaria judaica	
<i>Ruzo (RZ)</i>	507086,817 4673685,139	W	Praderas de Holcus lanatus	Holcus lanatus	Zona de media-alta densidad
<i>Percha (PER)</i>	503410,270 4676752,92	W	Pradera de Dactylis maritima	Dactylis maritima	Zona de alta densidad
<i>Isla de Ons</i>					
<i>Punta Centulo (PC1)</i>	506388,038 4694062,134	W	Ulicetum latebracteato-minoris	Ulex latebracteatus	Zona de media- alta densidad
<i>Punta Centulo (PC2)</i>	506376,120 4694105,095	W	Comunidades A. pachycarpa	A. pachycarpa	
<i>Punta Xubenco (PX)</i>	505642,312 4693742,724	W	Pastizales de A. pubigera	A. pubigera	Zona de baja densidad

Tabla 2. Características generales de las parcelas permanentes ubicadas en la zona control y colonia de gaviotas.

trado; 2) P-Fe: P adsorbido a óxidos e hidróxidos de Fe, fue extraído con una disolución de bicarbonato de sodio-ditionito (0,11M NaHCO₃ + 0,11M Na₂S₂O₄) a pH 7; 3) P-Al: P ocluido a arcillas y aluminio, fue extraído con una solución de hidróxido de sodio (0,1 M NaOH) tras 18h de agitación continua; 4) P-AH: P asociado a los ácidos húmicos, el extracto obtenido en el paso 3 fue acidificado con 2.5 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado y dejándolo en reposo una noche. Al cabo de este tiempo se formaron flóculos que sedimentaron en el fondo del recipiente, el sobrenadante se filtró y el filtro junto con el material retenido se secó a 45 °C y posteriormente se calcinó a 520 °C durante 2 h en una mufla. El P-AH fue determinado en las cenizas que se disolvieron en 5 ml de HCl 1M 5) P-Ca: P en forma de apatito, fue extraído con HCl 0,5 M durante 1 h en agitación; 6) P-res: P residual, que engloba formas orgánicas e inorgánicas de P, se obtiene por calcinación del residuo como en el paso 4). El procedimiento utilizado es una combinación de varios métodos (JENSEN & THAMDRUP, 1993; PALUDAN & JENSEN 1995 Y PALUDAN & MORRIS, 1999; SCHLICHTING *et al.*, 2002; LARGEAU, 2004).

El contenido de cationes intercambiables, Fe y Al extraído en oxalato de amonio, el P total y las formas de P se determinaron en un ICP-OES; mientras que el P-mehlich fue determinado en un espectrofotómetro a 880 nm de longitud de onda.

Recogida de agua de lluvia, regatos y agua de escorrentía

Se instalaron un total de 13 pluviómetros de vaso en las zonas de estudio. La distribución de los mismos en cada parcela fue: uno en las proximidades de cada parcela y otro en la parte superior de la ladera. Las muestras de agua se tomaron en función del régimen de precipitaciones de cada año. A continuación, las muestras de agua se filtraron a través de un filtro de 0,45 micras de tamaño de poro y en ellas se analizó pH, conductividad eléctrica, concentración de amonio y nitrato por cromatografía iónica y contenido de P y elementos traza por ICP-MS.

Muestro y análisis de excrementos

Durante la época de reproducción, se recogieron en la colonia muestras de excrementos, prestando especial cuidado de no incluir material del sustrato. Cada muestra estaba constituida por 5-10 excrementos. En cada muestra se analizó el contenido total de N, N inorgánico, PT, P mehlich y formas de P siguiendo la misma metodología que la descrita para los suelos.

Modelo Bioenergético

Para la determinación del N y P excretado por reproductores y pollos en la colonia del Parque Nacional se derivó el modelo extraído de RIDDICK *et al.* (2012) y WILSON *et al.* (2004). El modelo empleado incluye exclusivamente a las parejas reproductoras y a sus pollos, ya que, los individuos no reproductores pasan poco tiempo en la colonia. Para los individuos reproductores la cantidad anual de nitrógeno y fósforo excretado (g N/P ave-1 año-1 en la colonia) se calculó según las ecuaciones 1 y 2:

Ecuación 1:

$$N_{excr (reproductores)} = \frac{9.2 \cdot M^{0.774}}{F_{Ec} \cdot A_{eff}} \cdot F_{Nc} \cdot t_{cria} \cdot F_{tc}$$

Dónde Nexcr: cantidad de N excretado (g N ave⁻¹ año⁻¹ en la colonia); M: masa de adultos (g ave⁻¹); FNC: contenido de nitrógeno de la comida (g N g⁻¹ masa húmeda); FEC: contenido energético del alimento (kJ g⁻¹ masa húmeda); Aeff: la eficiencia de asimilación de los alimentos ingeridos (kJ [energía obtenida] kJ⁻¹ [energía en los alimentos]); tcria: la duración de la temporada de cría (días en la colonia); FTC: la proporción de tiempo dedicado a la colonia durante la época de reproducción (%).

Ecuación 2:

$$P_{excr (reproductores)} = \frac{9.2 \cdot M^{0.774}}{F_{Ec} \cdot A_{eff}} \cdot F_{Pc} \cdot t_{cria} \cdot F_{tc}$$

Dónde el término FNC de la ecuación 1 es sustituido por FPC que representa el contenido de fós-

foro de la comida (g N g⁻¹ masa húmeda) y cuyo valor es recogido en FURNESS (1991).

Pollos

Se considera pollo desde la eclosión hasta la etapa de volantón. La cantidad anual de nitrógeno y fósforo excretado por los pollos (g N/P ave⁻¹ año⁻¹; ecuaciones 3 y 4) se calcula de forma similar a las anteriores, cambiando la masa de un ave adulta por la masa del pollo (Mpollo, g), añadiendo el número de crías por pareja (Ppollo) y cambiando el valor de Ftc que pasa a ser del 100%.

Ecuación 3:

$$N_{excr(pollos)} = \frac{28.43 M_{pollo}^{1.06}}{F_{Ec} \cdot A_{eff}} \cdot F_{Nc} \cdot t_{cria} \cdot F_{tc} \cdot \frac{P_{pollo}}{2}$$

Ecuación 4:

$$P_{excr(pollos)} = \frac{28.43 M_{pollo}^{1.06}}{F_{Ec} \cdot A_{eff}} \cdot F_{Pc} \cdot t_{cria} \cdot F_{tc} \cdot \frac{P_{pollo}}{2}$$

Para la representación de los resultados se elaboraron mapas empleando un GIS (ArcGIS de ESRI 9 inc., 2011).

Análisis estadístico

Se empleó un análisis de la varianza de dos entradas para la comparación entre localidades y

periodo del año y su interacción, considerando la clase localidad (acantilados) como variable fija y estación (estación del año) como factor variable. Previamente los datos fueron transformados en logaritmos para alcanzar los requerimientos de normalidad y heterocedasticidad (varianza no constante). El análisis estadístico fue realizado con el programa SigmaStat 3.5.

RESULTADOS

Composición de las aguas de lluvia

El pH del agua de lluvia se situó en valores próximos a la neutralidad (Tabla 3) y la concentración iónica no fue extremadamente elevada, tal y como se pudiera esperar de su cercanía al mar, con valores medios para la conductividad eléctrica inferiores a los 1500 μS cm⁻¹. Sin embargo, esta idea es coherente con la alta precipitación obtenida en los acantilados, dando lugar a un fuerte proceso de dilución y lavado de sales que afecta tanto a la precipitación acumulada como a la salinidad de los suelos. Lo que sí parece ocurrir es la existencia de eventos salinos intensos, asociados a periodos de fuertes vientos y baja precipitación, que afecta o puede afectar a la distribución de las comunidades vegetales. Por otra parte, los tres pluviómetros de los acantilados de Faro da Porta mostraron de forma consistente concentraciones elevadas de Cu y As. Un mayor tránsito de barcos de pesca en la

Localidad	pH	CE	NH4 ⁺	NO3 ⁻	As	Cu
	μS cm ⁻¹		mg L ⁻¹		μg L ⁻¹	
<i>Cabo Home (Z. control)</i>	6,4±0,8	1415±920	0,60±0,93	0,81±0,82	0,93±0,39	1,01±0,37
<i>Islas Cíes</i>						
<i>Figueiras</i>	6,9±0,9	713±435	3,60±4,50	1,21±1,45	3,65±8,53	10,28±12,35
<i>Monte Herbas</i>	6,5±1,2	605±515	4,69±7,54	1,09±1,07	5,42±10,02	11,50±9,80
<i>Ruzo</i>	6,7±0,9	651±476	7,54±19,40	1,39±2,11	2,69±5,59	6,50±5,17
<i>Faro Porta</i>	7,4±1,0	1259±1907	2,67±4,07	1,23±1,26	11,96±5,50	14,68±15,56
<i>Isla de Ons</i>						
<i>Punta Centulo</i>	7,6±0,8	669±860	2,14±1,26	0,28±0,13	0,57±0,21	0,10±0,01

Tabla 3. Características físico-químicas y concentración de formas inorgánicas de N, As y Cu del agua de lluvia.

zona, junto con vientos de componente sur, parece ser la explicación más plausible. Igualmente cabe destacar la presencia de concentraciones elevadas en el agua de lluvia de nitrógeno inorgánico, principalmente amonio, lo cual puede contribuir a la eutrofización de otros ecosistemas del Parque.

Caracterización general de los suelos

Los suelos de los acantilados de las Islas Cíes, Ons y zona control se caracterizan por presentar un escaso desarrollo, con contacto lítico a los 15-25 cm de profundidad. El contenido de C orgánico para la mayor parte de las parcelas fue muy elevado superando el 10%, excepto en la parcela M. Herbas y Figueiras (Tabla 4) con porcentajes netamente inferiores. El pH_{H_2O} fue ácido en todos los casos (pH 5,1-5,9) y el pH_{KCl} fue del orden de 0,8 unidades inferior al pH_{H_2O} lo que indica la presencia de cationes de comportamiento ácido en el complejo de intercambio catiónico. El pH_{NaF} fue similar entre zonas, situándose en todas ellas en un valor medio de $\sim 7,5$ lo que indica que la presencia de compuestos de bajo grado de cristalinidad en estos suelos

es poco importante (TEJADA, 2012; OTERO *et al.*, 2015). En cuanto a la composición del complejo de intercambio catiónico, el catión dominante fue el Ca ($117-22,4 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$), seguido del Mg ($17,6-3,52 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$), Na ($6,17-1,63 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) y K ($1,61-0,71 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$). Por el contrario, el Al se situó para la casi totalidad de las muestras por debajo del límite de detección (Tabla 4) debido posiblemente a un pH próximo a 5,5 lo que limita su paso a la disolución y a la presencia de una capa de arena (principalmente de cuarzo) pobre en minerales alterables. La conductividad eléctrica del suelo mostró una ligera influencia marina si tenemos en cuenta los valores obtenidos para la disolución de los suelos graníticos gallegos ($C.E. 130-200 \mu\text{S cm}^{-1}$) (GARCÍA & MACÍAS, 1993). Los valores medios fueron significativamente más elevados en los suelos de la colonia de gaviotas que en la zona control, oscilando entre $1212 \pm 553 \mu\text{S cm}^{-1}$ en los suelos de los acantilados de Monte das Herbas en la isla del Faro - Islas Cíes y $216 \pm 97 \mu\text{S cm}^{-1}$ en la zona control (Tabla 4). Por otra parte, los suelos muestran un marcado desequilibrio textural, dominando netamente la fracción arena con valores medios supe-

Localidad	pH_{H_2O}	CE	C org.	Ca	Mg	Na	K	Al
		$\mu\text{S cm}^{-1}$	%					
Zona control								
<i>C. Home (CH)</i>	6,0±0,8	216±97	11,1±1,8	24,2±8,50	6,80±2,50	4,40±1,29	0,94±0,25	< ld
Islas Cíes								
<i>M. Herbas</i>	5,6±0,3	1212±553	4,0±1,3	22,4±4,80	5,40±0,60	3,29±0,5	0,80±0,14	< ld
<i>Figueiras</i>	5,7±0,3	695±271	14,7±3,4	73,7±7,10	12,2±1,12	4,80±0,80	1,13±0,06	< ld
<i>Figueiras</i>	5,7±0,7	698±231	6,8±1,8	26,0±4,20	7,72±1,23	3,74±1,05	1,23±0,32	< ld
<i>Faro Porta</i>	6,0±0,9	861±294	12,9±4,3	70,7±33,2	11,5±3,70	3,86±0,86	0,95±0,34	< ld
<i>Faro Porta</i>	6,8±0,5	561±108	14,0±2,4	117,5±37,3	17,6±6,19	6,17±3,54	1,61±0,92	< ld
<i>Ruzo</i>	5,7±0,9	464±120	12,4±6,2	83,25±7,83	10,6±0,44	4,93±0,95	1,50±0,27	< ld
Isla Ons								
<i>P. Centulo</i>	4,3±0,3	124±57	17,6±1,1	49,7±25,5	3,52±6,67	1,63±0,17	0,48±0,45	< ld
<i>P. Centulo</i>	5,7±0,6	1030±755	14,5±2,7	51,5±21,2	5,28±0,68	4,03±0,31	0,71±0,24	< ld
<i>P. Xubenco</i>	5,0±0,3	513±201	13,6±1,5	51,8±35,1	10,1±6,33	6,21±2,90	1,11±0,79	0,06±0,05

ld: < límite de detección

Tabla 4. Características generales de los suelos de la zona control y colonias de gaviota patiamarilla (n=6).

riosos al 78%, seguido de la fracción limo y arcilla con valores medios que oscilaron entre el 8-13%, lo que le confiere una clase textural arenosa franca, lo cual está de acuerdo con una concentración de óxidos e hidróxidos de Fe y Al de bajo orden de cristalinidad (en general Fe y Al soluble en oxalato de amonio <0,20%), (TEJADA, 2012).

Concentración de N y P en los excrementos de gaviota

La cantidad media de NT en los excrementos fue de 4,41±3,79% de la cual, el 7,2% fue de amonio (3183±1196 mg kg⁻¹) y sólo el 0,16% de nitrato (73,3±203 mg kg⁻¹); mientras que el contenido de PT fue de 31721±22270 mg kg⁻¹, del cual un 32% corresponde formas de P asimilables para las plantas (P-mehlich: 10220±8432 mg kg⁻¹) (Tabla 5).

El fraccionamiento del P puso de manifiesto que la forma dominante fue el P apatito (P-Ca: 19168±15912 mg kg⁻¹) y P-res (6036±4170 mg kg⁻¹). Las formas de P lábiles como el P-ads, y P-Fe/Mn presentaron concentraciones netamente inferiores

Archipiélago	N. excretado	P. excretado
Toneladas año ⁻¹		
Cíes	20,12	3,35
Ons	8,78	1,46
Sálvora	16,47	2,75
Total	45,37	7,56

Tabla 5. N y P excretado por individuos reproductores y pollos en las colonias de gaviota patiamarilla en los tres principales archipiélagos del Parque Nacional.

(P-ads: 1504±1257 mg kg⁻¹; P-Fe/Mn: 2590±1898 mg kg⁻¹) y por último, las concentraciones más bajas correspondieron al PAH (130±105 mg kg⁻¹) (Tabla 6).

N y P excretado según el modelo bioenergético

En la Tabla 6 y en las Figuras 3 y 4 se agrupan las estimaciones de N y el P excretado producidas por los individuos reproductores y sus pollos. El N y el P excretado total para el conjunto de las colonias del Parque Nacional fue de 45,37 t año⁻¹ y 7,56 t año⁻¹, respectivamente. Los archipiélagos con valores más altos de mayor a menor son Cíes, Sálvora y Ons.

Variación espacio-temporal de la concentración de N y P en el suelo de las colonias de gaviota

Nitrógeno inorgánico

En general, las concentraciones más bajas de N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻ correspondieron a los suelos de los acantilados de la zona control (sin gaviotas), con valores medios que oscilaron entre 10,6-41,2 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ y 15,1-44,2 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹. Valores ligeramente superiores se encontraron en el resto de las parcelas ubicadas en las colonias de gaviotas. Así, por ejemplo, en la PC1 los valores se encuentran entre 9,8-64,9 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ y 20,4-90,2 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹. Las concentraciones medias más elevadas en el caso de N-NH₄⁺ se obtuvieron en los acantilados de Monte das Herbas (MH: 15,7-136,0 mg N-NH₄⁺ kg⁻¹) y en el de N-NO₃⁻ fueron para Faro da Porta 2 (FP2: 43,3-142,0 mg N-NO₃⁻ kg⁻¹) (Tabla 7).

	N total %	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	P total	P-mehlich	P-ads	P-Fe	P-Al	P-AH	P-Ca	P-res
<i>C Home (Z control)</i>	0,52±0,13	29,7±5,0	21,5±7,8	569±290	32,4±24,5	7,9±2,9	3,7±1,7	28,8±3,7	13,1±7,7	17,7±3,2	50,2±4,9
<i>Suelo colonias</i>	1,12±0,46	45,5±22,6	52,5±27,8	1214±981	326±349	70,9±57,5	38,7±19,6	84,4±58,9	57,7±30,8	134,2±180,1	124±81,3
<i>Excrementos</i>	4,41±3,79	3183±1196	73,3±203	31721±22270	10220±8432	1504±1257	2590±1898	484±501	130±105	19168±15912	6036±4170

Tabla 6. Concentración de N y P total, formas inorgánicas de N y formas de N en los suelos de la zona control, colonias y excrementos de gaviota.

Por otra parte, todas las zonas estudiadas mostraron un claro patrón de variación estacional, de manera que las concentraciones más elevadas correspondieron siempre al mes de agosto, tanto en los suelos de las colonias como en la zona control, y las más bajas al mes de diciembre. En este sentido, cabe destacar que si bien la concen-

tración mínima obtenida en invierno es similar entre los suelos de las colonias e incluso con la zona control, en verano la concentración en los suelos de las colonias de la gaviota patiamarilla experimentan un incremento muy superior al obtenido para la zona control (Tabla 7). En este sentido, la ANOVA puso de manifiesto tanto di-

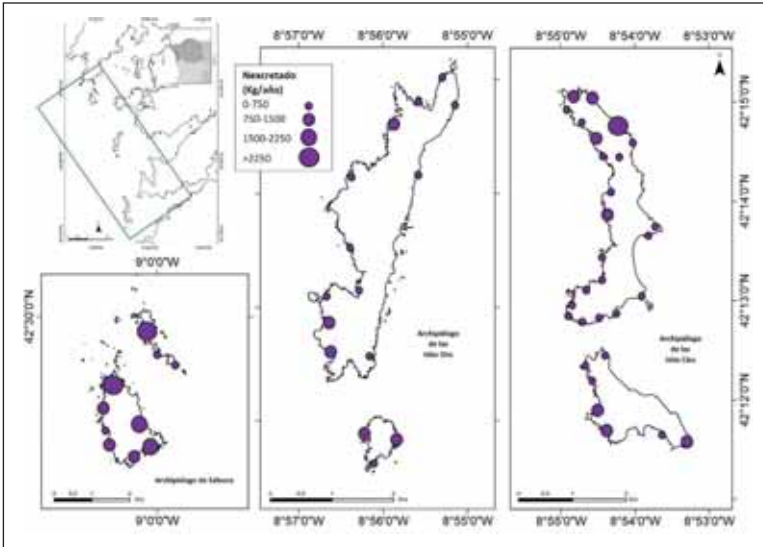


Figura 3. Nitrógeno excretado en las principales zonas de cría de gaviota patiamarilla en el Parque Nacional.

Figure 3. Nitrogen excreted in the main areas of breeding yellow-legged gull in the National Park.

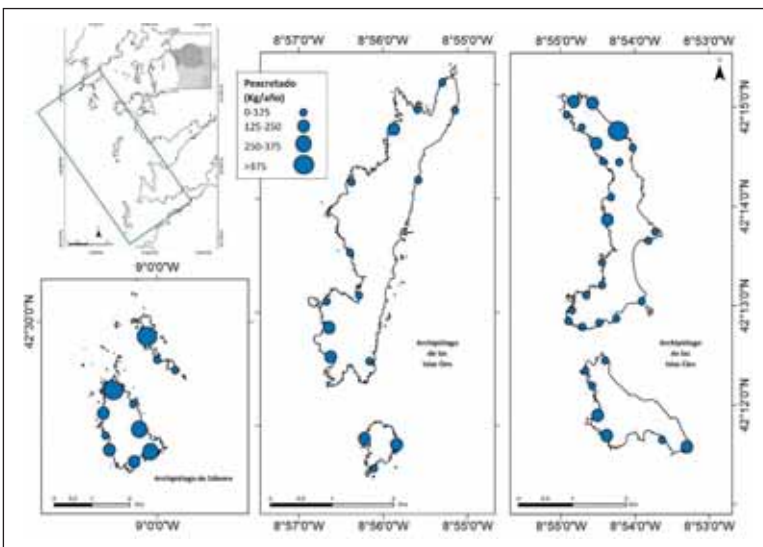


Figura 4. Fósforo excretado en las principales zonas de cría de gaviota patiamarilla en el Parque Nacional.

Figure 4. Phosphorus excreted in the main areas of breeding yellow-legged gull in the National Park.

Est	ZONAS DE ESTUDIO (media ± desviación típica)											ANOVA									
	CH	MH	FG1	FG2	Islas Cíes			RZ	FP1	FP2	PC1	PC2	PX	LOCALIDAD		ESTACIÓN		INTERACCIÓN			
					g.l.	F	P							g.l.	F	P	g.l.	F	P	g.l.	F
NH ₄ ⁺	Z. control																				
	Prim	35,3 ± 6,4	42,0 ± 3,9	40,3 ± 3,8	39,7 ± 4,5	34,8 ± 3,8	39,2 ± 3,9	44,6 ± 3,1	35,9 ± 2,3	39,5 ± 22,4	30,2 ± 9,6										
	Ver	41,2 ± 4,9	136,0 ± 115	66,7 ± 26,7	67,9 ± 31,0	56,3 ± 21,2	67,9 ± 21,2	107,0 ± 80,9	142,0 ± 73,8	64,9 ± 47,9	51,5 ± 21,0	48,9 ± 22,1	2,986	0,03	<0,001	2	46,310	<0,001	18	1,480	n.s.
	Inv	10,6 ± 10,2	15,7 ± 6,21	5,0 ± 4,4	15,7 ± 5,7	18,6 ± 4,2	10,3 ± 7,6	13,8 ± 5,0	9,8 ± 5,1	12,3 ± 3,9	6,1 ± 5,1										
	Prim	15,8 ± 2,1	30,2 ± 4,0	41,7 ± 11,5	28,0 ± 5,8	27,6 ± 9,3	36,9 ± 10,5	43,3 ± 16,1	20,4 ± 5,0	79,9 ± 23,0	21,2 ± 4,9										
	Ver	44,2 ± 12,4	89,2 ± 45,5	99,4 ± 42,3	70,5 ± 24,6	89,4 ± 43,5	95,9 ± 43,9	142,0 ± 33,8	90,2 ± 59,3	120,0 ± 24,6	59,3 ± 12,7	10,047	<0,001	2	50,519	<0,001	18	2,224	0,006		
NO ₃ ⁻	Inv	15,1 ± 12,5	29,5 ± 12,7	45,3 ± 20,2	23,1 ± 12,8	67,0 ± 25,9	106,0 ± 38,1	106,0 ± 15,6	22,1 ± 15,6	48,4 ± 15,0	37,3 ± 19,0										
	Prim	728,8 ± 100,6	387,2 ± 170,7	519,7 ± 78,8	560,0 ± 99,4	894,5 ± 240,0	1684,4 ± 1519,8	2858,5 ± 643,1	882,6 ± 56,7	1614,2 ± 714,9	985,7 ± 78,4										
	Ver	791,1 ± 99,4	856,8 ± 348,7	623,1 ± 107,5	890,6 ± 67,5	934,8 ± 233,4	1940,9 ± 1587,9	1917,3 ± 1098,1	1024,8 ± 433,1	1155,7 ± 539,7	1158,0 ± 238,3	10,50	<0,001	2	0,066	0,936	18	0,052	1,00		
	Inv	885,4 ± 107,3	576,5 ± 110,4	1216,5 ± 1130,3	936,3 ± 614,9	1021,8 ± 151,0	2596,8 ± 2062,3	3504,6 ± 1970,6	837,1 ± 112,4	996,4 ± 169,5	1263,7 ± 408,1										
	Prim	38,8 ± 20,2	69,6 ± 34,7	111,7 ± 64,1	109,9 ± 76,1	149,0 ± 80,0	169,0 ± 111,6	199,8 ± 199,8	341,9 ± 53,6	154,2 ± 21,1	138,2 ± 22,2										
	Ver	32,5 ± 8,1	74,8 ± 80,5	98,9 ± 42,3	134,5 ± 78,7	205,7 ± 69,1	213,5 ± 267,4	538,1 ± 564,2	155,7 ± 63,8	212,7 ± 126,1	183,9 ± 33,5	15,19	<0,001	2	0,997	0,370	18	0,778	0,726		
P Melitich	Inv	54,5 ± 23,6	83,9 ± 43,9	139,9 ± 124,2	115,1 ± 66,2	146,8 ± 48,4	258,3 ± 211,9	346,8 ± 98,5	100,6 ± 53,8	233,8 ± 148,2	118,3 ± 51,1										

CH: Cabo Home; MH: monte das Hervias; FG: Figueiras; RZ: Ruizo; FP: Faro da Porta; PC: Punta Centulo; PX: Punta Xuverno

Tabla 7. Concentración por localidades de formas de nitrógeno inorgánico, P total y P asimilable en suelos de las colonias de gaviota patiamarilla y zona control, y resultados obtenidos para la ANOVA.

ferencias significativas entre localidades como estacionales.

Fósforo total (Ptotal) y fósforo asimilable (P-mehlich)

Los suelos de la zona control mostraron las concentraciones más bajas, con valores medios de $569 \pm 290 \text{ mg kg}^{-1}$ para el P total y $32,4 \pm 24,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en el caso de P-mehlich (Tabla 6). Concentraciones significativamente superiores se obtuvieron para los suelos de las colonias de gaviota patiamarilla, con valores que fueron del orden de 2 a 4 veces superiores a los de la zona control para el P total y de 2 a 10 veces en el caso del P-mehlich (Tablas 6 y 7).

Estacionalmente en algunas zonas las concentraciones más elevadas parecen coincidir con el mes de agosto (final del periodo reproductivo) y las más bajas en invierno, pero no siempre se cumple este patrón (p. ej. suelos de Figueiras); no obstante, a diferencia del N en el caso del P total y P-mehlich no se han obtenido diferencias significativas entre los diferentes periodos del año (Tabla 7).

Fraccionamiento del Fósforo

La forma dominante de P en la zona control fue el P-res ($50,2 \pm 4,9 \text{ mg kg}^{-1}$) que representa más del 35% del sumatorio de todas las fracciones, seguido del P-Al ($28,8 \pm 3,7 \text{ mg kg}^{-1}$) que representa entre 21-26%, P-Ca ($17,7 \pm 3,2 \text{ mg kg}^{-1}$), P-AH ($13,1 \pm 7,7 \text{ mg kg}^{-1}$), P-ads ($7,9 \pm 2,9 \text{ mg kg}^{-1}$) y finalmente el P-Fe ($3,7 \pm 1,7 \text{ mg kg}^{-1}$). En el suelo de las colonias la concentración de las diferentes fracciones fue netamente superior, destacando el incremento de las fracciones de P más lábiles, como el P débilmente adsorbido que incrementó su concentración media 10 veces respecto a la zona control (P-ads: $70,9 \pm 57,5 \text{ mg kg}^{-1}$) y que está en consonancia con las elevadas concentraciones de esa fracción en los excrementos de gaviota (P-ads excrementos: $1504 \pm 1257 \text{ mg kg}^{-1}$; Tabla 6). No obstante las formas dominantes fueron el P-Ca ($134 \pm 180 \text{ mg kg}^{-1}$) y P-res ($124 \pm 81,3 \text{ mg kg}^{-1}$) seguidas de del P-Al ($84,4 \pm 58,9 \text{ mg kg}^{-1}$), P-AH ($57,7 \pm 30,8 \text{ mg kg}^{-1}$) y P-Fe ($38,7 \pm 19,6 \text{ mg kg}^{-1}$).

DISCUSIÓN

Las aves marinas forman densas colonias en los acantilados costeros durante el periodo reproductivo, alcanzando en algunos casos cifras que superan el millón de individuos (MATALONI *et al.* 2010). Esta elevada densidad de aves genera cambios notables en las propiedades y composición del suelo, así como en la composición específica y estructura de la vegetación (ANDERSON & POLIS, 1999; SLAWOMIR & SMAL, 2003; SIMAS *et al.* 2007; MARON *et al.*, 2006; MULDER *et al.*, 2009; MATALONI *et al.*, 2010, VIDAL *et al.*, 1998; DE LA PEÑA, 2012).

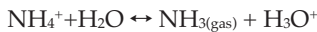
Uno de los efectos más destacados es la eutrofización del suelo debido principalmente a la incorporación de N y P y en menor medida K, que al mismo tiempo puede producir un desequilibrio entre nutrientes, principalmente Ca/P, K/Ca, K/Mg (GARCÍA *et al.*, 2002). En este sentido algunos autores han propuesto el término suelos *ornitogénicos* para los suelos de las colonias de pingüinos en la Antártida (UGOLINI, 1970, 1972, CAMPBELL & CLARIDGE, 1987) o el término más genérico de material ornitogénico (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006).

Dinámica del N en los suelos de las parcelas permanentes

Nuestros resultados muestran un claro enriquecimiento de las dos formas de N en todos los acantilados de las Islas Cíes y Ons, respecto a la zona control. No obstante, las diferencias entre acantilados no son tan claras, de manera que por localidades las diferencias son fundamentalmente entre las colonias y la zona control, pero no entre colonias. Por otra parte, cabe destacar las fuertes oscilaciones que se producen a nivel estacional, con una reducción notable de la concentración de N inorgánico en invierno. Fuertes variaciones estacionales también se encontraron en otros trabajos realizados en climas templado-húmedos (RASHID & SCHAEFER, 1988), en suelos gallegos (GARCÍA & MACÍAS, 1993) y en las colonias de otras especies de gaviotas (SOBEY & KENWORTHY, 1979). La razón fundamental reside en

las transformaciones que experimentan las formas de N en el suelo. El ácido úrico presente en los excrementos puede experimentar diversas transformaciones que afectan a su movilidad y salida del sistema edáfico. Así, en un primer momento un porcentaje relativamente elevado (a veces superior al 60%) se puede perder durante los primeros días por volatilización en forma de NH₃ (reacción 1).

Reacción 1:

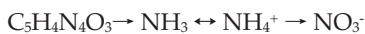


Este proceso se ve favorecido por la elevada temperatura del verano y el pH elevado de las heces (pH ~8); por lo que, cuando el excremento es depositado sobre el suelo, la pérdida es menor que cuando ocurre sobre la roca (ver p.ej. LINDEBOOM, 1984, BLACKALL *et al.*, 2008).

Los resultados obtenidos para el agua de lluvia del Parque Nacional muestran claramente un enriquecimiento en amonio respecto a la zona control. Este aspecto tiene una especial importancia ya que puede conducir a una eutrofización general del medio terrestre, con posibles consecuencias sobre las comunidades vegetales a medio-largo plazo.

Por otra parte, la mineralización del nitrógeno orgánico supone su transformación en amonio el cual puede ser adsorbido a los coloides del suelo y de esta manera reducir su pérdida por lavado (reacción 2).

Reacción 2:



Esto explica las bajas concentraciones de amonio en las aguas de escorrentía en los acantilados (en general, NH₄⁺: < 0,05 mg L⁻¹; datos no mostrados). No obstante su posterior oxidación y transformación a nitrato (reacción 2) favorece su lavado durante las intensas precipitaciones de otoño e invierno, ya que este anión apenas es adsorbido por el sistema coloidal del suelo. Este proceso está de acuerdo con la elevada concentración de ni-

trato en las aguas de escorrentía de la colonia (NO₃⁻: 12-22 mg L⁻¹) en comparación con la zona control (NO₃⁻: <0,05 mg L⁻¹).

El N es un importante limitante de la productividad de los ecosistemas terrestres. Por ello, un incremento en su deposición es considerado como un problema ambiental que produce serias alteraciones en el funcionamiento de los ecosistemas de carácter oligotrófico (ver por ej. VI-TOUSEK *et al.*, 1997; JACKSON-BLAKE *et al.* 2012).

Nuestros resultados pueden contribuir, en parte, a explicar la complejidad del mosaico vegetal de los acantilados del Parque Nacional. La presencia de especies ruderales en el Parque, con una mayor demanda de N, puede verse favorecida por el incremento estacional de este nutriente asociado a las colonias. No obstante, no permite establecer diferencias entre localidades; es decir, no existe un efecto “memoria” en el suelo que permita separar antiguas colonias con alta densidad de gaviotas (p.ej. Punta Centulo, Percha...) de aquellas otras de baja densidad y de reciente colonización (M. Herbas).

Dinámica del P en los suelos

Fósforo total y asimilable

La dieta de las aves marinas consiste principalmente en calamares y cangrejos, que le confieren al guano concentraciones elevadas de N y P (HUTCHINSON, 1950). Así por ejemplo, el guano depositado en las islas del Golfo de California tiene aproximadamente en promedio 4,8% de P, el cual fue superior al 3,2% de P encontrado en los excrementos de la gaviota patiamarilla (ver p. ej. OTERO *et al.*, 2015). Trabajos previos han puesto de manifiesto que la concentración de P total en los suelos de las colonias de aves marinas suele alcanzar valores extremadamente elevados, pero al mismo tiempo los resultados son muy variables. Así, para el fósforo total se han obtenido valores de 1300-6600 mg kg⁻¹ en colonias de pingüinos (MORRIS, 1994), de 2210-2230mg kg⁻¹ en nidos de gaviotas en la isla de Mayo en Escocia (SOBEY & KEN-

WORTHY, 1979) o 4600 mg kg^{-1} en Nueva Zelanda (MULDER *et al.*, 2009) con presencia de varias especies de aves (para más detalle ver OTERO *et al.*, 2015).

Teniendo estos resultados presentes, la concentración de P total de los suelos de las islas Cíes ocuparían las últimas posiciones, mientras que el P asimilable se situaría en una posición ligeramente superior. Esta diferencia puede ser debida a la mayor densidad de aves que anidan en las colonias de la costa de la Antártida o de California; pero también se puede deber a las propias condiciones ambientales, entre ellas el suelo, que caracterizan a los acantilados de las islas Cíes.

La capacidad del suelo para retener el P que se libera de los excrementos depende de varios factores que se pueden dividir en extrínsecos e intrínsecos al suelo. Como factores extrínsecos que favorecen la adsorción del P cabe citar la pendiente, de manera que en zonas de relieve llano la adsorción se ve favorecida, y una baja precipitación que reduce la pérdida de P por lavado y erosión. En cuanto a los factores intrínsecos al suelo juegan un papel relevante: la textura, de manera que suelos arenosos muestran una baja retención de P en colonias de aves marinas en Polonia (LIGEZA & SMAL, 2003); el pH ácido que le confiere a los coloides de carga variable una carga positiva, la presencia de oxihidróxidos de Fe y Al de baja cristalinidad y elevadas concentraciones de Ca (HAWKE *et al.*, 1999). En general, la inmovilización de P es más eficiente en suelos con carbonatos o sesquióxidos (óxidos de Al y Fe) ya que ambos pueden fijar fosfato y acelerar la precipitación de sus compuestos (KARDOS, 1995).

Teniendo esto presente, las condiciones que se dan en los acantilados de las islas Cíes y Ons (fuertes pendientes, alta precipitación, baja concentración de coloides en el suelo, textura arenosa ...) no son las que *a priori* garantizarían una elevada fijación del ión fosfato en el suelo, lo cual podría explicar la menor concentración de este nutriente en los suelos de las colonias del Parque Nacional en comparación con las colonias anteriormente co-

mentadas. No obstante, las concentraciones de P total y asimilable (P-mehlich) fueron significativamente superiores a las de la zona control (Tabla 7). Las concentraciones más elevadas de P total y asimilable (P-mehlich) correspondieron a los acantilados en donde las gaviotas llevan criando desde hace más tiempo y con una elevada densidad como Punta Centulo o Ruzo (ver también OTERO *et al.* 2015), mientras que las demás zonas fueron colonizadas posteriormente. Por tanto, los resultados parecen indicar que el P refleja la influencia de las colonias sobre el suelo a lo largo del tiempo; esto es el P se acumula progresivamente en el suelo (HAWKE *et al.* 1999). La retención del ión fosfato en el suelo es más fuerte que el N, porque el fosfato es retenido por los coloides del suelo o precipita formando compuestos estables (HUTCHINSON, 1950; LODER *et al.* 1996). La ausencia de gaviotas en la colonia y el incremento de la precipitación durante el periodo otoño-invierno no parece suponer una pérdida notable de este elemento del suelo, por ello, su concentración mantiene diferencias significativas con la zona control entre las estaciones del año (Tabla 7). No obstante, los análisis de las aguas de escorrentía mostraron concentraciones de fosfato del orden de 10 mg l^{-1} , muy superiores a las recogidas en otros regatos que no pasan por las colonias de aves marinas; lo cual está de acuerdo con el hecho de que los suelos de las colonias de gaviotas se encuentran saturados en P, según indica el grado de saturación (DPS) (OTERO *et al.*, 2015). En consonancia con los anteriores resultados, el P asimilable (P-mehlich) obtenido en los suelos de las colonias fue superior casi siempre a los 100 mg kg^{-1} lo cual es considerado el umbral a partir del cual los suelos pueden actuar como fuente de P para las aguas superficiales (SIMS *et al.*, 2002).

Fraccionamiento del P

La mayor parte del P presente en los excrementos de las aves marinas corresponde a formas poco solubles en agua y pueden estabilizarse en el suelo como insoluble pero potencialmente disponible para el consumo de la planta (WANG & TZOU, 1995). La eutrofización del suelo, debido a los aportes de las gaviotas, conduce a una mayor productividad vegetal (muy aparente en

los suelos de A Percha en donde crecen praderas de *Dactylis glomerata* subsp. *maritima* de gran porte y densidad) y a una incorporación de P en la biomasa vegetal y, por tanto, a un incremento del P orgánico. Los resultados muestran que una cantidad importante de P (10-20%) se encuentra asociado a los ácidos húmicos. Esta fracción, habitualmente minoritaria en otros medios (ver p. ej. JIMÉNEZ-CÁRCELES & ÁLVAREZ-ROGEL, 2008), cuenta con la particularidad de ser una fracción móvil y puede ser otra forma de salida de P de los suelos de las colonias de aves marinas. El P-res, considerado como P asociado a la materia orgánica refractaria (SCHLICHTING *et al.*, 2002; LARGEAU, 2004), también fue una forma importante para la mayoría de los suelos. En este sentido algunos autores han establecido que el fósforo tiende a asociarse primariamente con los grupos alkyl o aromáticos presentes en la materia orgánica humificada; mientras que cuando estos son minoritarios y predominan los carbohidratos, el P se asocia con los metales (HAMDAN *et al.*, 2012). En nuestro caso esta idea está de acuerdo con el alto contenido en materia orgánica de los suelos de las colonias y la relativa baja concentración de P-Fe y P-Al si se compara con los resultados de otros suelos (JENSEN & THRAMDRUP, 1993; JIMÉNEZ-CÁRCELES & ÁLVAREZ-ROGEL, 2008). Finalmente el P apatito (P-Ca) aparece como una fracción importante en algunos suelos, lo cual está de acuerdo con su abundancia en los propios excrementos de gaviota y con su alta estabilidad en el suelo.

CONCLUSIONES

Los excrementos de gaviota patiamarilla presentan concentraciones muy elevadas de N y P en todas sus formas si se comparan con las de los suelos naturales. Por este motivo los suelos de las colonias se encuentran claramente enriquecidos en estos elementos, encontrándose una fracción importante en forma asimilable o biodisponible para las plantas. Sin embargo el N y el P muestran comportamientos netamente diferenciados. El "exceso" de N inorgánico, existente en el suelo de las colonias al final del periodo reproductivo, es eliminado por lavado durante el invierno;

mientras que el P permanece en el suelo, manteniendo altas concentraciones a lo largo de los años. En consecuencia, los suelos de las colonias se encuentran enriquecidos en N inorgánico durante el periodo estival, pero en invierno las concentraciones se reducen a niveles propios de la zona control.

En el caso del P, no se han observado cambios estacionales importantes debido a que buena parte del fósforo que se deposita a través de los excrementos se encuentra precipitado en formas estables (p.ej. P-apatito). Por otra parte, la elevada concentración de fosfato en el agua de escorrentía de las colonias parece indicar que la capacidad del suelo para adsorber las formas más lábiles de P se encuentra saturada, lo cual está de acuerdo con la baja concentración de óxidos e hidróxidos de Fe y Al de bajo grado de cristalinidad presentes en estos suelos.

Por todo ello, los suelos de las colonias de gaviota patiamarilla actualmente actúan como fuente de N y P, que a través del agua de escorrentía están llegando a las aguas costeras.

AGRADECIMIENTOS

A la dirección del Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia, J.A. Fernández Bouzas, V. Piorno, M. Olmedo y su guardería por todo el apoyo y facilidades prestadas durante los trabajos de campo. Al Ministerio de Educación y Ciencia por la beca FPU otorgada a Saúl de la Peña Lastra. A María José Santiso por su colaboración en los trabajos de laboratorio. A Esther Sierra Abraín, Pablo Montero, Adrián González por su colaboración durante la toma de muestras. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación: Monitorización de los procesos biogeoquímicos en suelos de acantilados y aguas costeras en relación con la influencia de las colonias de aves marinas del Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia financiado por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Ref. 041/2010) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, W.B. & POLIS, G.A. 1999. Nutrient from water to land: seabird affect plant nutrient status on Gulf of California islands. *Oecologia* 118: 324-332.
- ARCEA. 1999. Influencia da colonia de gaivota común sobre a biodiversidade das illas Cíes: efecto sobre outras aves de interese, sobre a vexetación e sobre os solos de acantilados. Servicio Provincial de Medio Ambiente Natural. Xunta de Galicia Pontevedra.
- BARCENA F, DE SOUZA JE, FERNÁNDEZ DE LA CIGOÑA E, DOMÍNGUEZ J. 1987. Las colonias de aves marinas de la costa occidental de Galicia. Características, censo y evolución de sus poblaciones. *Ecología* 1:197-209.
- BARCENA F. 1977. Colonias de aves marinas en las islas Cíes. *Naturalia Hispania* nº 9, Icona. Madrid.
- Munilla I. 1997. Estudio de la población y la ecología trófica de la gaviota patiamarilla, *Larus cachinnans* pallas, en Galicia. PhD thesis. Universidad de Santiago de Compostela.
- BERNÁRDEZ VILLEGAS, J. G.; BLANCO-DIOS, J. B.; MOURIÑO LOURIDO, J.; RIGUEIRO RODRÍGUEZ, A. 2011. Flora y vegetación del Archipiélago de Cortegada (Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia). *Naturaleza y Parques Nacionales*.
- BERTSCH, P. M. & BLOOM, P. R. 1996. Aluminum. In D.L. Sparks, *et al.*, (Eds.) *Methods of soil análisis*. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc, American Society of Agronomy, Inc. Madinson. USA, pp.517-550.
- BLACKALL, T. D.; WILSON, L. J.; BULL, J.; THEOBALD, M. R.; BACON, P.J.; HAMER, K. C.; WANLESS, S.; SUTTON, M. A. 2008. Temporal variation in atmospheric ammonia concentrations above seabird colonies. *Atmospheric Environment* 42: 6942 - 6950.
- BLAKEMORE, L. C. 1978. Exchange complex dominated by amorphous material (ECDAM). In: Smith, G. D. (Ed.), *The Andisol Proposal*. Soil Bureau, DSIR, New Zealand, pp. 21-22.
- BUURMAN, P.; VAN LAGEN, B.; VELTHORST, E. J. 1996. *Manual for Soil and Water Analysis*. Backhuys publishers, Leiden.
- CAMPBELL, I. B. & CLARIDGE, G. G. C. 1987. Antarctica: soils, weathering processes and environment, In: *Developments in soil science*, Elsevier-Amsterdam, vol. 16, pp. 368.
- CARBALLEIRA, A.; DEVEGA, C.; RETUERTO, R.; SANTILLÁN, E.; UCIEDA, F. 1982. *Bioclimatología de Galicia*. Fundación Barrié de la Maza. A Coruña.
- DE GRAAF, M. C. C.; BOBBINK, R.; SMITS, N. A. C.; VAN DIGGELEN, R.; ROELOFS, J. G. M. 2009. Biodiversity, vegetation gradients and key biogeochemical processes in the heathland landscape. *Biological Conservation* 142: 2191-2201.
- DE LA PEÑA, S. 2012. Efecto de la colonia de gaviota patiamarilla (*Larus michahellis*) sobre las formas de nitrógeno inorgánico en suelos de acantilado del Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia (Memoria de master), Departamento de Edafología e Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidade de Santiago de Compostela.
- FIELDS, M. & PERROT, K. W. 1966. The nature of allophone in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophone. *N. Z. J. Sci.* 9: 623-629.
- FURNESS, R. W. 1991. The occurrence of burrow-nesting among birds and its influence on soil fertility and stability. *Symposia of the Zoological Society of London* 63: 53-67.
- GARCÍA, A. & MACÍAS, F. 1993. Variación anual de la mineralización del nitrógeno en sistemas forestales de Galiza. *Congreso Forestal Español V. I*: 145-150.
- GARCÍA, L. V.; MARAÑÓN T.; OJEDA, F.; CLEMENTE, L.; REDONDO, R. 2002. Seagull influence on soil properties, chenopod shrub distribution, and leaf nutrient status in semi-arid Mediterranean islands. *Oikos* 98: 75-86.
- GUITIÁN, J. & GUITIÁN, P. 1990. *A paisaxe vexetal das illas Cíes*. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela.

- HAMDAN, R.; EL-RIFAI, H.; CHEESMAN, A.; TURNER, B.; REDDY, K.; COOPER, W. 2012. Linking phosphorus to carbon humification in wetland soils by ³¹P and ¹³C NMR spectroscopy. *Environmental Science & Technology* . 46: 4775-4782.
- HAWKE, D. J.; HOLDAWAY, R. N.; CAUSER, J. E.; OGDEN, S. 1999. Soil indicators of pre-European seabird breeding in New Zealand at sites identified by predator deposits. *Australian Journal of Soil Research* 37: 103-113.
- HOLMGREN, G. G. 1967. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Science Society of America, Proceedings* 31: 210-211.
- HUTCHINSON, G. E. 1950. *Survey of Existing Knowledge of Biogeochemistry: The Biogeochemistry of Vertebrate Excretion*. American Museum of Natural History, New York.
- IUSS WORKING GROUP WRB. 2006. *World reference base for soil resources 2006*. 2nd edition. *World Soil Resources Reports*, FAO, Rome N° 103.
- JACKSON-BLAKE, L.; HELLIWELL, R. C.; GIBBS, S.; COULL, M. C.; DAWSON, L. 2012. Controls on soil solution nitrogen along an altitudinal gradient in the Scottish uplands. *Science of the Total Environment* 431: 100-108.
- JENSEN, H. S. & THRAMDRUP, B. O. 1993. Iron-bound phosphorous in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiology* 253: 47-59.
- JIMÉNEZ-CÁRCELES, F. J. & ÁLVAREZ-ROGEL, J. 2008. Phosphorus fractionation and distribution in salt marsh soils affected by mine wastes and eutrophicated water: a case study in SE Spain. *Geoderma* 144: 299-309.
- KARDOS, L. T. 1995. Soil fixation of plant nutrients. In: Bear, F. E. (Ed.), *Chemistry of the soils*. Reinhold Publishing Corporation, New York, pp. 177-199.
- KLEIJN, D.; BEKKER, R. M.; BOBBINK, R.; DE GRAAF M. C. C.; ROELOFS, J. G. M. 2008. In search for key biogeochemical factors affecting plant species persistence in heathland and acidic grasslands: a comparison of common and rare species. *Journal of Applied Ecology* 45: 680-687.
- KUO, S. 1996. PHOSPHOROUS. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods Part 3*. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 869-919.
- LARGEAU, C. 2004. Refractory macromolecular fraction of soil organic matter: chemical composition, sources and relationship with the stable fraction. *Eurosoil Meeting, Freiburg*.
- LIGEZA, S. & SMAL, H. 2003. Accumulation of nutrients in soils affected by perennial colonies of piscivorous birds with reference to biogeochemical cycles of elements. *Chemosphere* 52: 595-602.
- LINDEBOOM, H. J. 1984. The nitrogen pathway in a penguin rookery. *Ecology* 65: 269-277.
- LODER, I. T. C.; GANNING, B.; LOVE, J. A. 1996. Ammonia nitrogen dynamics in coastal rockpools affected by gull guano. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 196: 113-129.
- MARON, J.; ESTES, J.; CROLL, D.; DANNER, D.; ELMENDORF, S. 2006. An introduced predator alters Aleutian island plant communities by thwarting nutrient subsidies. *Ecological Monographs* . 76: 3-24.
- MATALONI, G.; GONZÁLEZ, G.; BÖLTER, M.; CONVEY, P.; FERMANI, P. 2010. What shapes edaphic communities in mineral and ornithogenic soils of Cierva point, Antarctic Peninsula? *Polar Science* 4: 405-419.
- MEHLICH, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of the mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15: 1409-1416.
- MORRIS, L. N. 1994. *Investigations into the soil and landforms of pre-European Maori gardens on Banks Peninsula, Canterbury, New Zealand*. B. Res. Studies (Hons) dissertation, Lincoln University, New Zealand.
- MULDER, C. P. H.; GRANT-HOFFMAN, M. N.; TOWNS, D. R.; BELLINGHAM, P. J.; WARDLE, D. A.; DURRETT, M. S.; FUKAMI, T.; BONNER, K. I. 2009. Direct and indirect effects of rats: does rat eradication restore ecosystem functioning of New Zealand seabird islands? *Biological Invasions* 11: 1671-1688.
- MULVANEY, R. L. 1996. Nitrogen-Inorganic forms. In: D. L. Sparks, *et al.*, (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc, American Society of Agronomy, Inc. Madinson. USA, pp.1123-1184.
- OTERO, X. L. & PÉREZ ALBERTI, A. 2009. *Parque Nacional de Marítimo Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia*. Ed. Lunwerg.

- OTERO, X. L.; TEJADA, O.; MARTÍN-PASTOR, M.; DE LA PEÑA, S.; FERREIRA, T. O.; PÉREZ-ALBERTI, A. 2015. Phosphorus in seagull colonies and the effect on the habitats. The case of yellow-legged gulls (*Larus michahellis*) in the Atlantic Islands National Park (Galicia-NW Spain). *Science of the Total Environment* 532: 383-397.
- PALUDAN, C. & MORRIS, J. T. 1999. Distribution and speciation of phosphorus along a salinity gradient in intertidal marsh sediments. *Biogeochemistry*, 45 (2): 197-221.
- PALUDAN, C. & JENSEN, H. S. 1995. Sequential extraction of phosphorus in freshwater wetland and lake sediment: Significance of humic acids. *Wetlands*, 15 (4): 365-373.
- PEECH, L.; ALEXANDER, L. T.; DEAN, L. A. 1947. *Methods of Soil analysis for soil fertility investigations*. UDA Cir. N° 757. U.S. Govt. Print. Office, Washington.
- PÉREZ, C.; BARROS, Á.; VELANDO, A.; MUNILLA, I. 2012. Seguimento das poboacións reproductoras de corvo mariño (*Phalacrocorax aristotelis*) e gaiyota patimarela (*Larus michahellis*) do Parque Nacional das Illas Atlánticas de Galicia.
- RASHID, G. H. & SCHAEFER, R. 1988. Seasonal variation in nitrogen mineralization and mineral nitrogen accumulation in two temperature forest soils. *Pedobiologia* 31: 381-390.
- RIDDICK, S. N.; DRAGOSITS, U.; BLACKALL, T. D.; DAUNT, F.; WANLESS, S.; SUTTON, M. A. 2012. The global distribution of ammonia emissions from seabird colonies. *Atmospheric Environment* 55: 319-327.
- SCHLICHTING, A.; LEINWEBER, P.; MEISSNER, R.; ALTERMANN, M. 2002. Sequentially extracted phosphorus fractions in peat-derived soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165: 290-298.
- SIMAS, F.; SCHAEFER, C.; MELO, V.; ALBUQUERQUE-FILHO, M.; MICHEL, R.; PEREIRA, V.; GOMES, M.; DA COSTA, L. 2007. Ornithogenic cryosols from maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. *Geoderma* 138: 191-203.
- SIMS, J.; MAGUIRE, R.; LEYTEM, A.; GARTLEY, K.; PAUTLER, M. 2002. Evaluation of Mehlich 3 as an environmental soil phosphorus test for mid-atlantic United States of America. *Soil Science Society of America Journal* 66: 2016-2032.
- SLAWOMIR, L. & SMAL, H. 2003. Accumulation of nutrients in soils affected by perennial colonies of piscivorous bird with reference to biogeochemical cycles of elements. *Chemosphere* 52: 595-602.
- SOBEY, G. G. & KENWORTHY, J. B. 1979. The relationship between herring gulls and the vegetation of their breeding colonies. *Journal of Ecology* 67: 469-496.
- TEJADA, O. 2012. Dinámica espacio-temporal del fósforo en suelos de la colonia de gaviota patiamarilla (*Larus michahellis*) en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia (MSc thesis). Santiago de Compostela University.
- UGOLINI, F. C. 1970. Antarctic soils and their ecology. In: *Antarctic ecology*, M. W. Holdgate (Ed.), New York: Academic Press, 2: 673-692.
- UGOLINI, F. C. 1972. Ornithogenic soils of Antarctica, In: *Antarctic Terrestrial Biology*, edited by G.A. Llano, American Geophysical Union. Antarctic Research Series. pp. 181-193.
- VIDAL, E.; MEDAIL, F.; TATONI, T. 1998. Is the yellow-legged gull a superabundant bird species in the Mediterranean? Impact on fauna and flora, conservation measures and research priorities. *Biodiversity and Conservation* 7: 1013-1026.
- VITOUSEK, P. M.; ABER, J. D.; HOWARTH, R. W.; LIKENS, G. E.; MATSON, P. A.; SCHINDLER, D. W.; *et al.* 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* . 7: 737-750.
- WANG, M. K. & TZOU, Y. M. 1995. Phosphate sorption by calcite, and iron-rich calcareous soils. *Geoderma* 65: 249-261.
- WASSEN, M. J.; VENTERINK, H. O.; LAPSHINA, E. D.; TANNEBERGER, F. 2005. Endangered plants persist under phosphorus limitation. *Nature* 437: 547-550.
- WILSON, L. J.; BACON, P. J.; BULL, J.; DRAGOSITS, U.; BLACKALL, T. D.; DUNN, T. E.; HAMER, K. C.; SUTTON, M. A.; WANLESS, S. 2004. Modelling the spatial distribution of ammonia emissions from seabirds in the UK. *Environmental Pollution* 131: 173-185.