

ESTRUCTURA ESPACIAL DE NUTRIENTES EDÁFICOS EN UN BOSQUE DE *PINUS PINASTER* DEL NO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Felisa Covelo Núñez y Manuel Delgado Baquerizo

Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide 41013-SEVILLA (España).
Correo electrónico: fcovnun@upo.es

Resumen

La distribución heterogénea de recursos esenciales para el crecimiento de las plantas puede tener una importante influencia en el crecimiento de las plantas y en las interacciones competitivas entre individuos, condicionando la estructura y composición de la comunidad de plantas. En este trabajo se ha caracterizado la estructura espacial de la concentración de nitrógeno y fósforo inorgánicos en el suelo de un pinar gallego, mediante el uso de técnicas geoestadísticas. Los resultados obtenidos muestran la existencia de estructura espacial en la concentración de N-NH_4^+ , N-NO_3^- y PO_4^{3-} en el suelo del pinar, que explicó el 52%, 60% y 63% respectivamente, de la variación en la concentración de estos nutrientes en la parcela de estudio. Los rangos de dependencia espacial fueron de 13,3 m y 3,6 m para el N-NH_4^+ y el N-NO_3^- respectivamente y de 8,6 m para el PO_4^{3-} . Las diferentes estructuras espaciales observadas en los dos nutrientes estudiados posiblemente reflejan el diferente control en la disponibilidad de ambos nutrientes, sugiriendo que el N está controlado en gran medida por los procesos de mineralización y un aumento del control geoquímico en la disponibilidad de P. Las correlaciones con el contenido en humedad y materia orgánica del suelo apoyan esta hipótesis.

Palabras clave: *Geoestadística, Dependencia espacial, Nitrógeno, Fósforo*

INTRODUCCIÓN

En comunidades de plantas terrestres la disponibilidad de recursos esenciales para el crecimiento de las plantas es espacialmente heterogénea, pudiendo variar por encima de un orden de magnitud a escalas relativamente pequeñas (ROBERTSON & GROSS, 1994). Esta heterogeneidad se origina y es mantenida por la acción combinada de varios procesos físicos, químicos y/o biológicos, que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales pudiendo originar diferentes patrones espaciales en las variables ambientales (GOOVAERTS, 1998). La composición de la roca madre, el microclima, la topografía, las

propiedades físicas del suelo, la actividad de la fauna edáfica, o perturbaciones como el fuego, las prácticas forestales y la herbivoría, han sido señalados entre los factores que pueden originar y modificar los patrones espaciales observados en la disponibilidad de nutrientes en el suelo. (DOCKERSMITH *et al.*, 1999; GUO *et al.*, 2004). Sin embargo, la gran mayoría de estudios sobre de la variación espacial de las propiedades del suelo se han centrado en su relación con la distribución de especies de plantas, por la influencia que pueden ejercer en la distribución espacial de nutrientes mediante diferentes procesos. Las características de la vegetación determinan la cantidad y composición de la hojarasca que llega al suelo, así como

su distribución espacial. Además, las plantas pueden modificar la estructura del suelo, la actividad microbiana, las condiciones de temperatura y humedad del suelo, la acidez y la disponibilidad de nutrientes (BRESHEARS et al., 1997; FINZI et al., 1998a, b; PRESCOTT, 2002). A su vez, la distribución espacial de los recursos esenciales para las plantas puede tener una importante influencia sobre el desarrollo de la vegetación a distintos niveles de complejidad. Por ejemplo, la estructura espacial que muestra un nutriente afecta de manera importante a la percepción de la calidad del hábitat por las plantas y por tanto, a su respuesta a la distribución heterogénea de recursos (WIJESINGHE & HUTCHINGS, 1999; HUTCHINGS, 2003). Del mismo modo, el tipo de plasticidad que las plantas desarrollan en respuesta a la distribución heterogénea de nutrientes en el suelo está fuertemente influenciada por la estructura espacial exhibida por cada nutriente (JACKSON & CALDWELL, 1996). Por ello, el conocimiento de la estructura espacial que muestran los nutrientes en una zona, especialmente el nitrógeno (N) y el fósforo (P) por tratarse de nutrientes limitantes del crecimiento en muchos ambientes naturales (VITOUSEK & HOWARTH, 1991), es interesante para un mejor conocimiento de la dinámica de la vegetación en dicha zona. En este trabajo se ha estudiado la heterogeneidad espacial de la concentración de N y P inorgánicos en el suelo de un pinar gallego, mediante el uso de técnicas geoes-tadísticas. Los objetivos del estudio son: 1) caracterizar los patrones de variación espacial de la concentración de nitrógeno y fósforo en el suelo; 2) comparar los patrones de distribución espacial de los dos nutrientes estudiados, y 3) identificar los factores que han originado o que mantienen los patrones de distribución espacial de los nutrientes en la parcela de estudio.

METODOLOGÍA

Diseño de muestreo

El estudio se llevó a cabo en un bosque de *Pinus pinaster* en el NO de la península (42° 10' N, 08° 40' W), donde ejemplares jóvenes de roble (~10-15 años) constituyen la especie arbórea dominante en el sotobosque. En una parcela de 120 m x 120 m, se marcó la posición exacta de los

ejemplares de roble (un total de 125), mediante el cálculo de sus coordenadas cartesianas siguiendo el método descrito por BOOSE et al. (1998). Tomando como referencia la posición de cada individuo, se tomaron muestras de suelo a 0,7 m del tronco y en uno de los individuos, muestras cada 25 cm para recoger la variación espacial a diferentes escalas. La cantidad de luz transmitida a través del dosel arbóreo en la parcela de estudio se determinó mediante fotografías hemisféricas tomadas en la posición de cada roble.

Análisis de las muestras

Las muestras de suelo se secaron en la estufa a una temperatura de 50°C hasta alcanzar peso constante, calculándose el contenido en humedad del suelo como diferencia entre el peso fresco y el seco, expresado como porcentaje del primero. El contenido en materia orgánica del suelo se determinó mediante combustión a 500 °C (ALLEN et al., 1974). A partir de las muestras de suelo se determinó el contenido de P inorgánico extraíble con ácido acético al 2,5%, y el contenido de nitrógeno inorgánico (N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻) mediante la extracción con KCl 1M. El análisis de P y N en los extractos de suelo se llevó a cabo mediante colorimetría por los métodos de azul de molibdeno y azul de indofenol respectivamente, según el procedimiento propuesto por SIMS et al. (1995).

Tratamiento de los datos

La estructura espacial de las variables analizadas se determinó mediante el análisis de la semivarianza de los datos obtenidos (Figura 1), con el paquete geoes-tadístico para Windows GS+ 5.3 ([http:// gammadesign.com](http://gammadesign.com)). El tratamiento estadístico de los datos se llevó a cabo con el programa STATISTICA 5.0 (STATSOFT, Inc., 1995). El tratamiento de las fotografías de la cubierta vegetal en la parcela de estudio, se llevó a cabo mediante el software de análisis de imágenes GLA (Gap Light Analyzer).

RESULTADOS

Los coeficientes de variación (CV) del contenido en humedad y materia orgánica del suelo mostraron relativamente baja variabilidad en



Figura 1. Representación esquemática del semivariograma mostrando la proporción de varianza mostrada con el incremento de distancia entre las muestras. El modelo aleatorio es esperado cuando las variables no presentan estructura espacial. El modelo esférico es esperado cuando las variables muestran autocorrelación espacial a lo largo del rango (A_0) e independencia espacial por encima de esta distancia. La varianza total es la suma de la variación explicada por el modelo espacial (C) y la encontrada a una escala más fina que la muestreada (varianza nugget, C_0)

comparación con el de la concentración de nutrientes en el suelo. La menor variabilidad correspondió a la radiación transmitida al sotobosque, con un CV del 10,3%. Entre los nutrientes, el PO_4^{3-} fue el menos variable (23,9%), mientras que el N-NO_3^- fue el más variable (55,3%), (Tabla 1). Todas las variables estudiadas mostraron estructura espacial, que explicó entre el 37% y el 63% de la variación de las muestras en la parcela de estudio (Tabla 1). Los mayores rangos de dependencia espacial correspondieron al contenido en materia orgánica del suelo, con muestras espacialmente dependientes a distancias inferiores a los 40 m. La humedad del suelo y la radiación total transmitida al sotobosque mostraron dependencia espacial a distancias inferiores a los 15,1 m y 14,3 m respectivamente. Los rangos de dependencia espacial de los nutrientes estudiados fueron de 8,6 m para el PO_4^{3-} y 13,3 m para el N-NH_4^+ , mientras que el N-NO_3^- presentó una estructura espacial de grano más fino, con muestras espa-

cialmente dependientes a distancias inferiores a los 3,6 m (Tabla 1; Figura 2). El contenido en nutrientes en el suelo no correlacionó significativamente con la cantidad de luz transmitida a través del dosel arbóreo, pero mostró una correlación positiva con el contenido en materia orgánica y humedad del suelo, si bien sólo las correlaciones entre estas dos variables y el N-NH_4^+ explicaron un porcentaje de la variación de los datos superior al 20% (Tabla 2).

DISCUSIÓN

El patrón de variación espacial observado en las variables del suelo analizadas coincide con los resultados encontrados en otros trabajos (LISTER *et al.*, 2000; GALLARDO, 2003; GUO *et al.*, 2004). Las diferencias en variabilidad (CV) y estructura espacial observadas entre las distintas variables sugieren una regulación por diferentes mecanismos que operan a distintas

	Media	CV (%)	Nugget (C_0)	Sill ($C_0 + C$)	Rango (m)	($C / C_0 + C$) (%)	r^2
Humedad (%)	18,3	23,1	5,45	14,6	15,1	37,3	0,934
Materia orgánica (%)	17,2	21,6	0,017	0,044	39,9	38,7	0,760
Radiación total transmitida (%)	24,8	10,3	2,89	6,51	14,3	55,6	0,985
N- NH_4^+ ($\mu\text{g g}^{-1}$)	31,1	40,8	77,0	159,8	13,3	51,8	0,935
N- NO_3^- ($\mu\text{g g}^{-1}$)	6,5	55,3	5,46	13,5	3,6	60,0	0,978
PO_4^{3-} ($\mu\text{g g}^{-1}$)	1,1	19,4	0,03	0,055	8,6	62,8	0,959

Tabla 1. Media, coeficiente de variación (CV) y parámetros de los semivariogramas de las variables estudiadas. $n = 523$ para las variables edáficas; $n = 125$ para las medidas de radiación total (directa + difusa) transmitida al sotobosque en la parcela de estudio. Los ajustes de los semivariogramas al modelo esférico fueron significativos ($p < 0.05$)

	1	2	3	4	5	6
(1) Humedad (%)	1,000					
(2) Materia orgánica (%)	0,656***	1,000				
(3) Radiación total transmitida (%)	0,192*	0,02	1,000			
(4) N- NH ₄ ⁺ (µg g ⁻¹)	0,449***	0,415***	0,147	1,000		
(5) N- NO ₃ ⁻ (µg g ⁻¹)	0,109*	0,162**	-0,068	0,150**	1,000	
(6) P-PO ₄ ³⁻ (µg g ⁻¹)	0,195***	0,380***	-0,029	0,237***	0,092	1,000

Tabla 2. Coeficientes de correlación lineal (r) de las variables estudiadas. n = 523. Los asteriscos indican que la correlación es significativa al nivel 0,001 (***), 0,01 (**) y 0,05 (*)

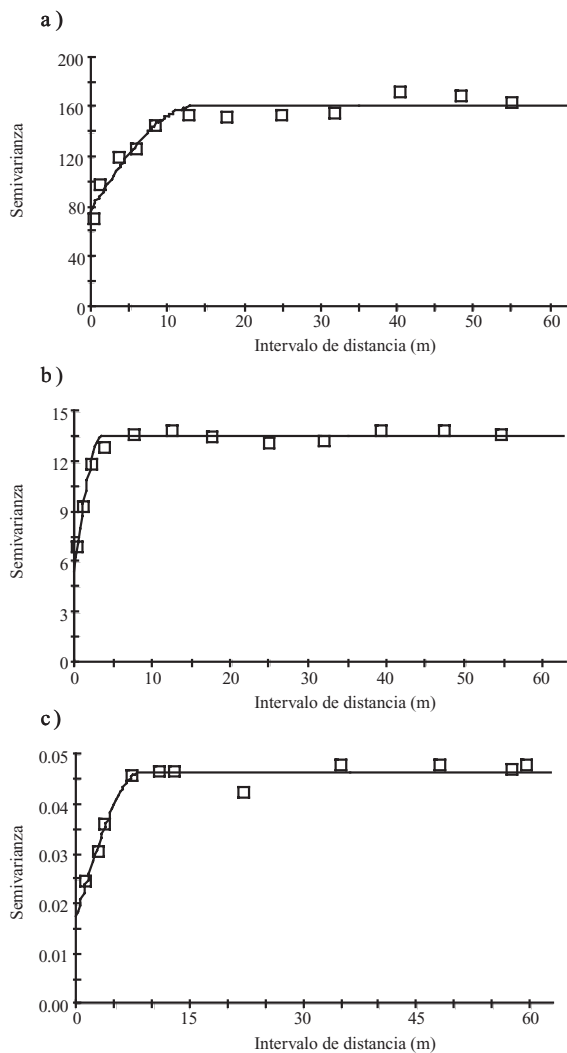


Figura 2. Semivariogramas de la concentración de N-NH₄⁺(a); N-NO₃⁻(b) y PO₄³⁻(c), en la parcela de estudio

escalas. La escala de variación espacial observada en el contenido en materia orgánica muestra la influencia de la entrada de hojarasca en el sistema, proceso que opera a gran escala y que lleva a una homogenización de ambiente edáfico (LISTER *et al.*, 2000). Si bien la entrada de hojarasca procedente de los individuos de roble podría aumentar la heterogeneidad a pequeña escala, los resultados obtenidos pueden reflejar la dominancia del dosel arbóreo de pinos en la zona de estudio. Por su parte, los patrones espaciales del contenido en humedad del suelo y concentración de nutrientes son modificados por procesos que operan a escalas más finas, y más dinámicos temporalmente (redistribución del agua de lluvia, actividad del sistema de raíces, transformaciones microbianas localizadas, inmovilización, etc), lo que explicaría el aumento de variación a escalas más pequeñas en estas variables (GUO *et al.*, 2004).

La diferente estructura espacial mostrada por el N y el P en el suelo coincide con los resultados obtenidos en otros trabajos (JACKSON & CALDWELL, 1993; GALLARDO, 2003a; GUO *et al.*, 2004). Este resultado podría explicarse como consecuencia de las diferencias biogeoquímicas entre ambos nutrientes. Mientras que la concentración de N mineral en el suelo depende básicamente del balance entre la tasa de mineralización de N y la absorción de N por las plantas y microorganismos del suelo (asumiendo entradas atmosféricas y pérdidas vía lavado o desnitrificación relativamente bajas), la concentración de P extraíble depende además de su interacción con minerales del suelo, que pueden retener considerables cantidades de P en formas no disponibles para las plantas (RAGHOTHAMA, 1999; GALLARDO, 2003b). De este modo, la distribución espacial de N estaría afectada por fenómenos que operan a escalas más finas (ej. absorción por raíces, actividad de microorganismos del suelo), mientras que el P estaría regulado además, por factores que tienden a homogeneizar el ambiente edáfico. Las correlaciones del contenido en humedad y materia orgánica del suelo con los dos nutrientes estudiados apoyan el diferente control en la disponibilidad de ambos nutrientes, sugiriendo que el N está controlado en gran medida por los procesos de mineralización y un aumento del control geo-

químico en la disponibilidad de P. La diferente estructura espacial observada en la concentración de NH_4^+ y NO_3^- coincide con los resultados obtenidos en diferentes ecosistemas (GROSS *et al.*, 1995; GALLARDO, 2003a, b). La mayor escala de variación mostrada por el NH_4^+ se explicaría como consecuencia de su menor movilidad en el suelo y de su tendencia a ser retenido en superficies de intercambio catiónico. La disponibilidad de luz en la parcela mostró un rango de autocorrelación espacial muy similar al observado en el contenido en humedad del suelo y la concentración de NH_4^+ (13 m-15 m), sin embargo no muestra correlación con estas variables, posiblemente debido a la baja variación en la disponibilidad de luz en la zona de estudio (CV ~10%), que se explicaría por la estructura relativamente homogénea, tanto espacial como temporalmente, del dosel arbóreo constituido por pinos (RICH, 1990).

Teniendo en cuenta la influencia que la vegetación ejerce en la distribución espacial de nutrientes cabría esperar una coincidencia entre ésta y el área de influencia de los individuos dominantes en la comunidad. Sin embargo solo una variable, la concentración de NO_3^- , presenta una distancia de autocorrelación inferior a los 3-4 m, que es la escala coincidente con el área de influencia de los individuos adultos de pino (LISTER *et al.*, 2000). El resto de las variables superan esta distancia, por lo que su distribución espacial está determinada por otros factores que se expresen a escalas de 10 a 20 metros, como podrían ser cambios en la topografía, apertura de claros, o cambios en la densidad de pinos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, S.E.; GRIMSHAW, H.M; PARKINSON, J.A. & QUARMBY, C.; 1974. *Chemical Analysis of Ecological Materials*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- BOOSE, E.R.; BOOSE, E.F. Y LEZBERG, A.L.; 1998. A practical method for mapping trees using distance measurements. *Ecology* 79: 819- 827.
- BRESHEARS, D.; RICH, P.M.; BARNES, F.J. & CAMPBELL, K.; 1997. Overstorey- imposed heterogeneity in solar radiation and soil

- moisture in a semiarid woodland. *Ecol. Appl.* 7: 1201- 1215.
- DOCKERSMITH, I.C.; GIARDINA, C.P. & SANFORD, R.L.; 1999. Persistence of tree related patterns in soil nutrients following slash-and-burn disturbance in the tropics. *Plant Soil* 209: 137-156.
- FINZI, A.C.; CANHAM, C.D. & VAN BREEMAN, N.; 1998a. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8: 440-446.
- FINZI, A.C.; CANHAM, C.D. & VAN BREEMAN, N.; 1998b. Canopy tree- soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. *Ecol. Appl.* 8: 447- 454.
- GALLARDO, A.; 2003a. Effect of tree canopy on the spatial distribution of soil nutrients in a Mediterranean Dehesa. *Pedobiologia* 47: 117- 125.
- GALLARDO, A.; 2003b. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in Northwest Spain. *Ecosystems* 6: 564- 576.
- GOOVAERTS, P.; 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico- chemical soil properties. *Biol. Fert. Soils* 27: 315- 334.
- GROSS, K.L.; PREGITZER, K.S. & BURTON, A.J.; 1995. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities. *J. Ecol.* 83: 357-367.
- GUO, D.; MOU, P.; JONES R.H. & MITCHELL, R. J.; 2004. Spatio-temporal patterns of soil available nutrients following experimental disturbance in a pine forest. *Oecologia* 138: 613- 621.
- HUTCHINGS, M.J.; JOHN, E.A. & WIJESINGHE, D.K.; 2003. Toward understanding the consequences of soil heterogeneity for plant populations and communities. *Ecology* 84: 2322- 2334.
- JACKSON, R.B. & CALDWELL, M.M.; 1993. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *J. Ecol.* 81: 683- 692.
- JACKSON, R.B. & CALDWELL, M.M.; 1996. Integrating resource heterogeneity and plant plasticity: modelling nitrate and phosphate uptake in a patchy soil environment. *J. Ecol.* 84: 891- 903.
- LISTER, A.J.; MOU, P.; JONES, R. H. & MITCHELL, R. J.; 2000. Spatial patterns of soil and vegetation in a 40-year-old slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) forest in the Coastal Plain of South Carolina, USA. *Can. J. For. Res.* 30: 145- 155.
- PRESCOTT, C.E.; 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiol.* 22: 1193- 1200.
- RAGHOTHAMA, K.G.; 1999. Phosphate acquisition. *Annu. Rev. Plant. Phys.* 50: 665- 693.
- RICH, P.M.; 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Rem. Sens. Rev.* 5: 13- 29.
- ROBERTSON, G.P. & GROSS, K.L.; 1994. Assessing the heterogeneity of belowground resources: quantifying pattern and scale. In: M.M. Caldwell y R.W. Pearcy (eds.), *Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: 237-252*. Academic Press. New York.
- SIMS, G.K.; ELLSWORTH, T.R. & MULVANEY, R.L.; 1995. Microscale determination of inorganic nitrogen in water and soil extracts. *Commun. Soil Sci. Plant.* 26: 303-316.
- STATSOFT, Inc.; 1995. *STATISTICA for Windows [Computer program manual]*. Statsoft, Inc., 2325 East 13th Street. Tulsa. OK.
- VITOUSEK, P.M. & HOWARTH, R.W.; 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry* 13: 87-115.
- WIJESINGHE, D.K & HUTCHINGS, M.J.; 1999. The effects of environmental heterogeneity on the performance of *Glechoma hederacea*: the interactions between patch contrast and patch scale. *J. Ecol.* 87: 860-872.