



**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL FÓSFORO Y
NITRÓGENO DE LA BIOMASA MICROBIANA DEL SUELO Y LA
DINÁMICA DE LIBERACION-INMOVILIZACIÓN DE
NUTRIENTES EN UN BOSQUE MIXTO DE QUERCÍNEAS DEL
PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES.**



Proyecto fin de carrera
Carlos Ros González
Sevilla, Enero de 2009

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA.
UNIVERSIDAD DE SEVILLA.**

**INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES Y AGROBIOLOGÍA DE SEVILLA
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS.**

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL FÓSFORO Y
NITRÓGENO DE LA BIOMASA MICROBIANA DEL SUELO Y LA
DINÁMICA DE LIBERACION-INMOVILIZACIÓN DE
NUTRIENTES EN UN BOSQUE MIXTO DE QUERCÍNEAS DEL
PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES.**

Trabajo fin de carrera realizado entre enero de 2008 y enero de 2009 en:

- Departamento de Geoecología del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. CSIC.*
- Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Universidad de Sevilla.*

Los directores del Proyecto:

Lda. Cristina Aponte Perales, Departamento de Geoecología, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC.

Dr. Luís Ventura García Fernández, Departamento de Geoecología, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, CSIC.

Dra. María del Carmen Florido Fernández, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla.

Memoria que presenta D. Carlos Ros González, para optar al título de Ingeniero Técnico Agrícola, especialidad en explotaciones agropecuarias.

Sevilla, Enero 2009.

Este trabajo se encuadra en el proyecto de investigación DINAMED (CGL2005-05830-C03-01-BOS), financiado por la CICYT (MEC) durante el trienio 2006-2008 y coordinado por el Dr. Teodoro Maraon Arana.

A mis padres.

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, a todos aquellos que habéis participado del presente trabajo y habéis ayudado a que llegue este día que parecía tan lejano.

A M^a Carmen Florido y Luis V. García, por dirigirme y darme la oportunidad de participar en este proyecto, a Eduardo Gutiérrez por su paciencia y ayuda y a Cristina Aponte, como resumirlo, por su inestimable ayuda, dedicación, paciencia, preocupación..., gracias Cris. Y como olvidarme de mis compañeras de laboratorio, Ana, Marga y María, de las que me llevo muy buenos recuerdos y una muy buena amistad.

A mis padres, por su esfuerzo y sacrificio, y a mis hermanos y cuñados, ya sé que he tardado, pero al final lo he conseguido, gracias por no desesperar demasiado. A mis sobrinos: Inés, Emma, Ingrid y Miguelito, por hacerlo todo más fácil, a los que no sois de la familia, o eso dicen, pero lleváis toda una vida conmigo, Belén, Borja, Javi, Jesús, Marián, M^a Carmen, Sara y Susana y a los que lleváis un poquito menos: Alberto, Carmen, Cristian, Eti, Peri, Silvia...

Y por supuesto, como olvidarme de “mis peritas”, con aquellas que hace ya tanto tiempo empecé este “viaje” que por fin, y lo digo claro, por fin llega a su fin: Anita, Beina y Reyita, a los que aparecieron después: Esther, Joe y Mari y a aquellos que se quedaron en el camino, que no fueron pocos...

Ojalá no me olvidase de nadie, pero eso es imposible, así que si estas leyendo esto y aún creyendo que debería aparecer tu nombre no está, gracias y lo siento.

ÍNDICE.

ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN: RELACIONES SUELO-PLANTA.	20
1.1. COMPOSICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS Y NUTRICIÓN.	20
1.1.1. NITRÓGENO.....	22
1.1.1.1. Dinámica del Nitrógeno en el suelo.....	23
1.1.2. FÓSFORO.....	25
1.1.2.1. Dinámica del Fósforo en el suelo.....	26
1.2. BIOLOGÍA DEL SUELO.	27
1.2.1. MASA MICROBIANA.....	30
2. OBJETIVOS	34
3. MATERIAL Y MÉTODOS.	38
3.1. DESCRIPCIÓN ÁREA GENERAL DE ESTUDIO.	38
3.1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	38
3.1.2. MEDIO FÍSICO.....	38
3.1.2.1. Geología.....	38
3.1.2.2. Hidrografía.....	40
3.1.2.3. Clima.....	41
3.1.2.4. Vientos.....	41
3.1.3. MEDIO BIÓTICO.....	42
3.1.3.1. Vegetación.....	42
3.1.4. APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS.....	42
3.2. DESCRIPCIÓN ESPECIES DE ESTUDIO.	43
3.2.1. QUERCÍNEAS.....	44
3.2.1.1. <i>Quercus suber</i> L.....	44
3.2.1.2. <i>Quercus canariensis</i> Willd.....	45
3.2.2. TREPADORAS O LIANAS.....	46
3.2.2.1. <i>Hedera helix</i> L.....	46
3.2.2.2. <i>Smilax aspera</i> L.....	47
3.2.3. OTRAS ESPECIES ARBUSTIVAS O ARBORESCENTES.....	47
3.2.3.1. <i>Arbutus unedo</i> L.....	47
3.2.3.2. <i>Erica arborea</i> L.....	48
3.2.3.3. <i>Genista linifolia</i> L.....	49
3.2.3.4. <i>Phillyrea latifolia</i> L.....	49
3.2.3.5. <i>Pistacia lentiscus</i> L.....	50
3.2.3.6. <i>Viburnum tinus</i> L.....	50

3.3. DESCRIPCIÓN SITIOS EXPERIMENTALES DEL BOSQUE.....	51
3.3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	51
3.3.2. DESCRIPCIÓN GEOMORFOEDÁFICA Y AMBIENTAL.....	52
3.3.2.1. Vegetación.....	54
3.3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TOMA DE MUESTRAS.....	54
3.3.4. DETERMINACIONES ANÁLITICAS.....	56
3.3.4.1. Humedad.....	57
3.3.4.2. Materia orgánica.....	57
3.3.4.3. Contenido de amonio.....	57
3.3.4.4. Método de fumigación- extracción.....	58
3.3.4.5. Extracción y determinación del fósforo disponible.....	59
3.3.4.6. Extracción y determinación del nitrógeno disuelto.....	60
3.3.4.7. Cálculo del nitrógeno y fósforo microbiano.....	60
3.3.4.8. Análisis de datos.....	61
3.3.4.8.1. Comparación de grupos.....	61
3.3.4.8.2. Variación conjunta de variables (análisis de correlaciones).....	62
3.3.4.8.3. Repetición de tests.....	63
3.3.4.8.4. Software empleado.....	63
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
4.1 VARIABILIDAD DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y NITRÓGENO DISPONIBLES Y RETENIDAS EN LA MASA MICROBIANA	66
4.1.1. FÓSFORO OLSEN.....	66
4.1.1.1. Primavera.....	66
4.1.1.2. Verano.....	70
4.1.2. FÓSFORO BRAY.....	74
4.1.2.1. Primavera.....	74
4.1.2.2. Verano.....	78
4.1.3. NITRÓGENO.....	81
4.1.3.1. Primavera.....	81
4.1.3.2. Verano.....	84
4.2. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES.....	87
4.2.1. CORRELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NUTRIENTES DISPONIBLES Y RETENIDOS.....	87
4.2.2. CORRELACIONES ENTRE LAS FRACCIONES DE P Y N MICROBIANO Y LAS CONDICIONES ABIÓTICAS DEL MEDIO.....	90
5. CONCLUSIONES.....	94
6. BIBLIOGRAFÍA.....	96
Webs.....	101

TABLAS.

Tabla 1.- Funciones esenciales que desempeñan los diferentes tipos de organismos del suelo (Ibañez, 2007).	29
Tabla 2.- Datos climatológicos de precipitación y temperatura en los dos sitios experimentales de bosque.	53
Tabla 3.- Valores medios y de desviación estándar correspondientes a la concentración en mg.kg^{-1} de fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidos en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos (P. Olsen).	66
Tabla 4.- Valores medios en mg.kg^{-1} y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos (P. Olsen)	71
Tabla 5.- Valores medios en mg.kg^{-1} y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos (P. Bray)	74
Tabla 6.- Valores medios en mg.kg^{-1} y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos (P Bray)	78
Tabla 7.- Valores medios (mg.kg^{-1}) y de desviación estándar correspondientes al nitrógeno microbiano (Nmic), al amonio (NH_4^+) y proporción de nitrógeno potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Ninm) medidos en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos.....	81
Tabla 8.- Valores medios (mg.kg^{-1}) y de desviación estándar correspondientes al nitrógeno microbiano (Nmic), al amonio (NH_4^+) y proporción de nitrógeno potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Ninm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos.	85

Tabla 9.- Correlaciones entre las variables estudiadas, correspondiente a la estación de primavera para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm.....89

Tabla 10.- Correlaciones entre las variables estudiadas, correspondiente a la estación de verano para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm.90

Tabla 11.- Correlaciones entre las variables estudiadas y las condiciones abióticas del medio para dos estaciones, primavera y verano, de forma global y para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm.91

GRÁFICOS.

Gráfico 1.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Olsen, medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera.....67

Gráfico 2.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Olsen en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera..68

Gráfico 3.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera (P. Olsen).69

Gráfico 4.- Valores medios en mg.kg^{-1} y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Olsen medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.....71

Gráfico 5.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Olsen en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.....72

Gráfico 6.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano (P. Olsen).....73

Gráfico 7.- Valores medios en mg.kg^{-1} y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Bray medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera.....75

Gráfico 8.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Bray en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera.	76
Gráfico 9.- Proporción de fósforo inmovilizado con respecto al total de fósforo potencialmente disponible retenido en la masa microbiana medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera (P. Bray).....	77
Gráfico 10.- Valores medios en mg.kg^{-1} y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Bray medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.	79
Gráfico 11.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Bray en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.	80
Gráfico 12.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano (P. Bray).	80
Gráfico 13.- Valores medios (mg.kg^{-1}) y error típico correspondientes al nitrógeno microbiano medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera.	82
Gráfico 14.- Valores medios (mg.kg^{-1}) y error típico correspondientes al NH_4^+ medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera.....	83
Gráfico 15.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera (Nitrógeno).....	84
Gráfico 16.- Valores medios y error típico correspondientes al nitrógeno microbiano medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.....	85
Gráfico 17.- Valores medios y error típico correspondientes al NH_4^+ medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano.	86
Gráfico 18.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano (Nitrógeno).	87

FIGURAS.

Figura 1.- Dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta (Domínguez, 1996).	23
Figura 2.- Equilibrio entre las distintas formas del fósforo en el suelo (Navarro y Navarro, 2003).	27
Figura 3.- Representación esquemática de los distintos tipos de suelos presentes en el Parque Natural Los Alcornocales.....	40
Figura 4.- Mapa de localización geográfica del área de estudio.....	51
Figura 5.- Mapa topográfico y ortofoto aérea experimentales de bosque <i>Tiradero</i>	52
Figura 6.- Mapa topográfico y ortofoto aérea experimentales de bosque <i>Panera</i>	52

IMÁGENES.

Imagen 1.- <i>Quercus suber L.</i>	44
Imagen 2.- <i>Quercus canariensis Willd.</i>	45
Imagen 3.- <i>Hedera helix L.</i>	46
Imagen 4.- <i>Smilax aspera L.</i>	47
Imagen 5.- <i>Arbutus unedo L.</i>	47
Imagen 6.- <i>Erica arborea L.</i>	48
Imagen 7.- <i>Genista linifolia L.</i>	49
Imagen 8.- <i>Phillyrea latifolia L.</i>	49
Imagen 9.- <i>Pistacia lentiscus L.</i>	50
Imagen 10.- <i>Viburnum tinus L.</i>	50
Imagen 11.- Barrena de media caña.....	55
Imagen 12.- Recogida muestras.....	55
Imagen 13.- Muestra tamizada a 2mm.....	56
Imagen 14.- Desecador de vacío. Proceso de fumigación.	59

I. INTRODUCCIÓN.

1. INTRODUCCIÓN: RELACIONES SUELO-PLANTA.

El suelo es el resultado de la transformación de la roca madre como consecuencia de la acción de diversos factores físicos, químicos y biológicos (Fisher y Binkley, 2000). Debido a su ubicación entre el mundo mineral y el orgánico se trata de un auténtico ecotono, que permite el contacto entre la roca madre subyacente y la biocenosis superficial (Gobat *et al.* 2004).

El suelo es un sistema dinámico, hogar para miles de organismos, receptor de desechos, filtro de sustancias tóxicas y almacén de escasos nutrientes (Fisher y Binkley, 2000). Podríamos destacar como principales funciones ecológicas la producción de biomasa (alimento, fibra y energía), su labor como reactor que filtra, regula y transforma la materia para proteger de la contaminación el ambiente, las aguas subterráneas y la cadena alimentaria y su papel como hábitat biológico y reserva genética de muchas plantas, animales y organismos, que estarían protegidos de la extinción.

El suelo debe ser considerado como un sustrato heterogéneo, constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) donde cada una de estas fases influye en el suministro de nutrientes. Las partículas inorgánicas de la fase sólida contiene nutrientes tales como K, Na, Mg, Fe, Mn, Zn y Co, mientras que las partículas orgánicas constituyen la principal reserva de elementos como el N y, en menor medida, P o S. La fase líquida del suelo (solución del suelo) es responsable del transporte de nutrientes y del intercambio de estos entre suelo y raíces. Los nutrientes transportados en la fase líquida están presentes de forma iónica, mientras que el O₂ y el CO₂ se encuentran disueltos de forma molecular. La fase gaseosa media en el intercambio gaseoso que tiene lugar entre los organismos vivientes en el suelo (planta, bacterias, hongos, animales) y la atmósfera. El suministro de O₂ a los seres vivos del suelo y la renovación del CO₂ desprendido por la actividad respiratoria son procesos que tienen lugar en el seno de la fase gaseosa.

1.1. COMPOSICIÓN MINERAL DE LAS PLANTAS Y NUTRICIÓN.

Las plantas están constituidas por materia orgánica, agua y sales minerales. Las cantidades relativas de estos tres componentes pueden ser varias, pero para las plantas

verdes, el agua es el componente que se halla en mayor proporción (70%), mientras que los minerales se hallan en menor proporción que el resto (3%). Los minerales representan, por lo tanto, un pequeño porcentaje de la composición total del tejido vegetal vivo, aunque tienen una extremada importancia metabólica.

Durante el periodo de crecimiento de las plantas, las raíces actúan en el suelo como un sumidero de nutrientes, absorbiendo los elementos disponibles para ser utilizados en la síntesis de los constituyentes orgánicos de las plantas. Una vez concluido el ciclo de vida de la planta, los nutrientes son liberados al suelo como materia orgánica muerta.

Aunque en las cenizas de las plantas puedan aparecer todos los elementos existentes en la litosfera, sólo algunos son considerados como nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo, para ello deben cumplir tres requisitos:

- La carencia del elemento hace imposible que la planta pueda completar su ciclo de vida.
- La carencia es específica para ese elemento en concreto.
- El elemento está directamente relacionado con la nutrición de la planta.

Los elementos considerados esenciales de forma general podemos separarlos en dos grandes grupos. Los primeros representan del 90 al 95% del peso seco de las plantas y están constituidos por C, O e H obtenidos a partir del CO₂ de la atmósfera y del agua del suelo. El restante 5-10%, se compone de N, P, K, Ca, S, Mg, Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo y Cl, estos elementos constituyen la denominada fracción mineral y son suministrados por el suelo. Estos 16 elementos se consideran esenciales para el normal crecimiento y reproducción de las plantas, de tal forma que cuando falta alguno de ellos o están en cantidades muy pequeñas las plantas no completan su ciclo vegetativo (Fuentes, 1994; Navarro y Navarro, 2003).

Los nutrientes se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos.

- Macronutrientes: se encuentran en la planta y son necesarios para ella en cantidades relativamente elevadas. Según este criterio, serían: C, H, O, N, P, S, K, Ca, Mg (de forma general), Na y Si (en algunos casos).
- Micronutrientes: Son tan necesarios para la planta como los anteriores pero se encuentran en menor proporción. El contenido en micronutrientes es, con frecuencia, muy superior a los requerimientos fisiológicos. Serían: Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl.

Las sales minerales son las suministradoras de los elementos nutritivos que las plantas requieren para el desarrollo de su ciclo vital. Proceden de rocas de la litosfera, las cuales y a través de muy diversos procesos, se van degradando hasta convertirse en compuestos solubles. En el agua del suelo, estos compuestos se disocian en mayor o menor grado en cationes y aniones, pudiendo mantenerse libres en la disolución o fijarse a merced de sus cargas eléctricas en las partículas coloidales. Esta reserva alimenticia, fácilmente asimilable por la planta, desde el punto de vista cuantitativo es muy pequeña en comparación con la cantidad del total inasimilable, pero también presente en el suelo. Casi el 98% de los bioelementos del suelo se encuentran formando parte de restos orgánicos, materiales húmicos, compuestos inorgánicos difícilmente solubles o minerales. Representan, sin embargo, una reserva nutritiva, que va siendo preparada lentamente por meteorización o mineralización del humus. En su forma asimilable, sólo el 2%, aproximadamente, se presenta adsorbido a las partículas coloidales del suelo y menos del 0,2% en disolución (Navarro y Navarro, 2003).

Es necesario indicar que un elemento muy importante, el nitrógeno, no es constituyente de las rocas. Su presencia en el suelo y en las aguas naturales se debe a la descomposición de diversos compuestos, de origen animal o vegetal, a la fijación del N atmosférico por determinados microorganismos o, en menor proporción, al arrastre de lluvias del fijado por descargas eléctricas (Navarro y Navarro, 2003).

1.1.1. NITRÓGENO.

Es el elemento esencial para el crecimiento de las plantas. Macroelemento que se ve afectado de manera escasa por los procesos de intercambio catiónico, de modo que su dinámica en el suelo viene regulada principalmente por los procesos de mineralización y solubilización. Bajo condiciones naturales, el N del suelo no proviene de la degradación de la roca madre. Todo el que normalmente se encuentra en él deriva, en última instancia, del que existe en la atmosfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación, fundamentalmente de tipo biológico (Navarro y Navarro, 2003).

La transformación del N molecular atmosférico en N del suelo utilizable actual o potencialmente por las plantas, se realiza principalmente según dos procesos: 1) el N puede oxidarse y pasar a la forma de óxidos, por acción de descargas eléctricas, y estos compuestos, a su vez, trasladados al suelo por la lluvia y depositados en él como ácido

nitroso o nítrico. La magnitud de este proceso aunque no carece de importancia, es pequeña en comparación con las cantidades de N molecular que se convierte en orgánico en virtud de proceso 2) Fijación biológica, es decir, por medio del conjunto de reacciones gracias a las cuales los organismos vivos integran el N molecular en sus estructuras como componentes de diversos compuestos. Ciertos microorganismos que viven libremente en el suelo y otros que viven simbióticamente con determinadas plantas (principalmente leguminosas), son capaces de realizar esta incorporación; algunos grupos son los responsables de que se mantenga en un cierto nivel el N contenido en el suelo (Navarro y Navarro, 2003).

La forma predominante del N en el suelo es el nitrógeno orgánico, que normalmente es superior al 90% del N total del suelo. Sin embargo, el N orgánico no está disponible para la planta. Este N puede ser transformado y liberado bajo la forma de compuestos más sencillos, mediante un conjunto de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico. Las formas minerales de nitrógeno más abundantes en el suelo son los iones nitrato y amonio, que son las formas que absorbe la planta. La baja fuerza eléctrica de ambas formas determina una baja capacidad para ser absorbido por las arcillas, y se encuentra mayoritariamente en la solución del suelo, donde son rápidamente absorbidos por las plantas, perdidos por drenaje o inmovilizados por efecto de los microorganismos.

1.1.1.1. Dinámica del Nitrógeno en el suelo.

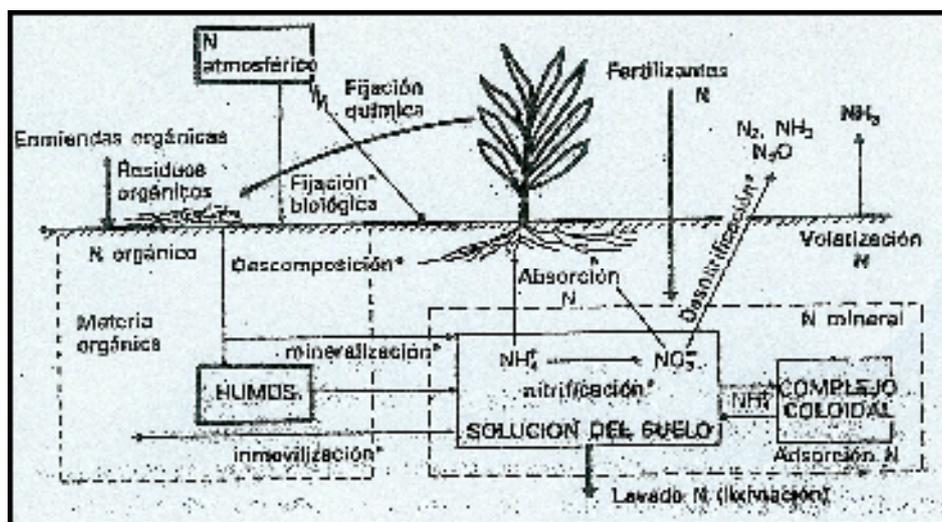


Figura 1.- Dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta (Dominguez, 1996).

En todos los suelos, y de forma continua, existen considerables entradas y salidas de N, acompañadas de muchas transformaciones complejas. El conjunto de todos esos procesos constituye una parte importante del ciclo general del N en la naturaleza. El N existente en el suelo procedente de restos de plantas, nitratos aportados por las lluvias, fijación biológica... sufre grandes transformaciones antes de ser utilizado por los vegetales superiores. Las proteínas son degradadas, originando productos de descomposición más sencillos y, finalmente, parte del nitrógeno aparece en forma de nitrato. Aún entonces no queda sin transformar, pues es apropiado tanto por los microorganismos como por las plantas superiores para construir sus estructuras proteicas, o reducido, en determinadas condiciones, a su estado elemental. Las pérdidas se deben a la absorción por las plantas, a la erosión, lixiviación y a su volatilización en condición gaseosa, tanto en forma elemental como en forma de óxidos o de amoníaco.

La dinámica del N en suelos está, pues, altamente influenciada por tres grandes procesos: las ganancias de N mediante la fijación del N atmosférico y las aportaciones en el agua de lluvia, las plantas verdes o los fertilizantes, las transformaciones en el suelo tales como la aminificación (degradación bioquímica de las proteínas y otros compuestos complejos nitrogenados en aminoácidos y aminos), la amonificación (transformación bioquímica de los aminoácidos y aminos en ácido nítrico), la nitrificación u oxidación bioquímica del amoníaco en ácido nítrico y la síntesis proteica de los microorganismos del suelo, a partir de los compuestos que se originan en el transcurso de los anteriores procesos. Y finalmente las pérdidas del N en el suelo por medio de la desnitrificación o reducción bioquímica de los nitratos bajo condiciones anaeróbicas, las reacciones químicas de los nitritos bajo condiciones aeróbicas, las pérdidas por volatilización del amoníaco, principalmente en suelos alcalinos, cálidos y húmedos, la lixiviación de nitratos, la asimilación de los nitratos por las plantas superiores y la fijación del amonio por las arcillas con entramado de expansión y en suelos con alto contenido en materia orgánica. Cada uno de estos procesos depende, a su vez, de un conjunto de secuencias íntimamente ligadas entre sí (Gobat *et al.* 2004).

1.1.2. FÓSFORO.

El origen del P en el suelo, a partir de material parental, oscila de manera general entre el 80 y el 40% del total. El resto del P del suelo proviene de formas orgánicas, gracias a procesos de reciclaje. Las formas dominantes de P autóctono en los suelos dependen de las propiedades del mismo y esencialmente del grado de meteorización y evolución del suelo, del pH y de la mineralogía.

Está comprobado que aunque en la mayor parte de los suelos las necesidades de P podrían estar cubiertas con el P total, existen graves deficiencias nutritivas, ya que no existe suficiente P en forma asimilable. Estas deficiencias condicionan la flora natural y la aptitud de los suelos hacia diferentes especies vegetales, siendo los suelos forestales particularmente pobres en este nutriente (Fisher y Binkley, 2000).

Podemos encontrar en el suelo P en forma orgánica o inorgánica, pero el P inorgánico es casi siempre predominante, excepto en los suelos donde la materia orgánica se halla en gran proporción. El orgánico suele ser mayor en las capas superficiales que en el subsuelo, debido a la acumulación de materia orgánica en las mismas. Debe indicarse también, en cuanto al contenido total, que generalmente suele ser más alto en los suelos jóvenes vírgenes y en las áreas donde las lluvias no son excesivas (Navarro y Navarro, 2003). El fósforo insoluble puede representar hasta 6 tm/ha, mientras que el P asimilable oscila entre 5 y 25 Kg/ha. Además el contenido de P disminuye fuertemente frente a la profundidad del perfil (es decir, con la disminución de coloides orgánicos). La relación media entre P total no asimilable y P asimilable oscila entre 0,8 y el 4 % en los suelos más fértiles, lo que da idea de la baja asimilabilidad de este elemento.

El P inorgánico puede encontrarse en disolución, precipitado o adsorbido. Precipitará en forma de fosfatos según el tipo de suelo y se encontrará adsorbido a óxidos e hidróxidos de Fe y Al, al borde de los minerales de arcilla y la superficie de los carbonatos en suelos calcáreos. El P disuelto en la solución del suelo se encontrará fundamentalmente en forma de ortofosfato y el grado de disociación dependerá del pH del suelo. El P orgánico es escaso y el 80 % de él está formado por fitina, fosfolípidos y ácidos nucleicos. La cantidad de P orgánico va a estar, generalmente, relacionada con la cantidad de materia orgánica, según esta relación se producirá una inmovilización o mineralización del P.

Las plantas absorben P esencialmente como formas disociadas del ácido ortofosfórico, particularmente como ión monofosfato, en ocasiones también como ión bifosfato pero nunca como trifosfato, ya que no es soluble en agua. Otras formas en las que el P puede ser, posiblemente, absorbido por las plantas son en forma de piro o metafosfato, así como ciertos fosfatos orgánicos solubles. El fósforo asimilable puede encontrarse como fosfatos solubles en la solución del suelo o bien en forma aniónica intercambiable, bien en los enlaces positivos de las arcillas, de los sesquióxidos o de los humatos cálcicos.

El P es un elemento esencial en la nutrición vegetal ya que es componente de los ácidos nucleicos como el ADN, muchas sustancias intermedias en la fotosíntesis y en la respiración celular están combinadas con el fósforo, y los átomos de fósforo proporcionan la base para la formación de los enlaces de alto contenido de energía del ATP.

1.1.2.1. Dinámica del Fósforo en el suelo.

La mayor parte del P normalmente presente en los suelos no es aprovechable por las plantas, debido a su gran insolubilidad; y que el elemento para que pueda ser asimilado es necesario que se encuentre como PO_4H_2^- o PO_4H^{2-} en la disolución del suelo.

Normalmente en todos los suelos, la cantidad de fosfato asimilable que contiene la disolución es muy pequeña (en la mayor parte de los casos de 0,1 a 1 mg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{l}$). Esta cantidad depende de la modificación del equilibrio dinámico que mantienen la disolución de los compuestos inorgánicos insolubles o fijados por una parte, y la formación y descomposición de materia orgánica por otra.

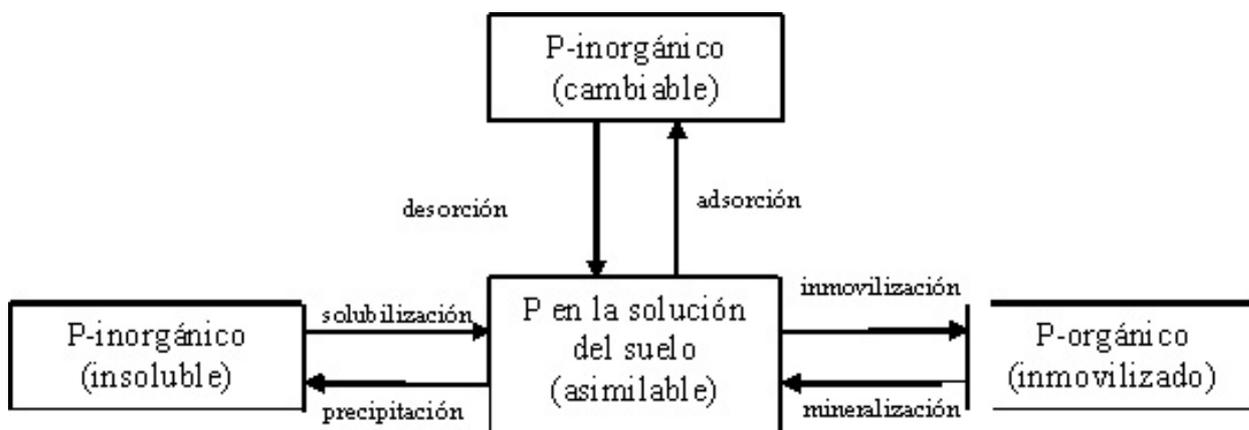


Figura 2.- Equilibrio entre las distintas formas del fósforo en el suelo (Navarro y Navarro, 2003).

Varios son los factores que pueden modificar este equilibrio. De todos ellos, el pH del suelo es el que condiciona el tipo de reacciones y situaciones posteriores que pueden aparecer en el suelo y que controlan, en definitiva, el aprovechamiento de las formas asimilables del P por las plantas (Navarro y Navarro, 2003).

1.2. BIOLOGÍA DEL SUELO.

En el suelo conviven gran cantidad de organismos tales como los innumerables microorganismos invisibles (por ej. bacterias y hongos), la microfauna (por ej. protozoarios y nemátodos), la mesofauna (por ej. ácaros y tisanuros) y la macrofauna, mejor conocida (por ej. lombrices y termitas. Las raíces de las plantas también pueden considerarse organismos del suelo debido a su relación simbólica e interacción con los demás elementos del suelo. Estos diversos organismos interactúan entre sí y con las diversas plantas del ecosistema, formando un complejo sistema de actividad biológica (Gobat *et al.* 2004).

La acción de los organismos en el suelo básicamente se puede resumir en dos:

1. Una acción de tipo mecánico, consiste en la fragmentación y descomposición de restos y residuos orgánicos, produciéndose posteriormente un proceso de mezcla con los componentes inorgánicos del suelo. Este mezclado ocurre como consecuencia del movimiento de los microorganismos del suelo. Este movimiento también origina en el suelo una serie de huecos o poros.

2. Mineralización de compuestos inorgánicos, convirtiéndose en moléculas sencillas y asimilables por la planta. Los organismos también excretan al suelo compuestos orgánicos que ellos mismos degradan hasta compuestos inorgánicos asimilables por las plantas. Estos organismos también pueden actuar fijando nitrógeno atmosférico y actúan básicamente en los ciclos biológicos y naturales de los distintos elementos del suelo: C, N, S, Mn, Fe...

En algunos casos estas acciones se van a ver reforzadas por las asociaciones con otros organismos, que pueden ser bien simultáneas o sucesivas, en las que unos organismos utilizan los productos residuales de los otros organismos que han actuado en el paso anterior de la cadena trófica.

En la *Tabla 1*, se muestran algunas de las funciones esenciales que desempeñan los organismos en el suelo.

Corresponde a los microorganismos el predominio en los fenómenos metabólicos a los que se ven sometidas las sustancias orgánicas e inorgánicas, tanto de forma cuantitativa, por su número, como cualitativa por las importantes funciones que asumen. No obstante, no se debe infravalorar la importante función desarrollada por los organismos animales, especialmente en las primeras fases de descomposición de la materia orgánica. En efecto, si bien las bacterias, los actinomicetos, los hongos y las algas son los organismos que actúan directamente en la destrucción de la materia orgánica, en la síntesis y en la mineralización de los compuestos húmicos, en la fijación de nitrógeno y en otros procesos de vital importancia, los lumbrícidos, los ácaros y los insectos intervienen en transformaciones de carácter químico ligadas a sus procesos de digestión, además de en la estructura física de los horizontes edáficos, que afecta a la aireación, drenaje y mezcla de ellos (García, 2005).

Tabla 1.- Funciones esenciales que desempeñan los diferentes tipos de organismos del suelo (Ibañez, 2007).

FUNCIONES EN EL SUELO	ORGANISMOS IMPLICADOS
Mantenimiento de la estructura.	Bioturbación por invertebrados y sistemas radiculares de las plantas, micorrizas y algunos tipos de microorganismos.
Regulación de la hidrología del suelo.	Invertebrados con mayor potencial de bioturbación y sistemas radiculares.
Intercambio de gases con la atmósfera y secuestro del carbono.	La mayor parte de los microorganismos y sistemas radiculares y carbono retenido en agregados compactos de origen biogénico (como las pelotas fecales de lumbrídeos).
Eliminación de compuestos tóxicos.	La mayor parte de los microorganismos del suelo.
Ciclo de Nutrientes.	La mayoría de microorganismos y raíces, así como algunos invertebrados que se alimentan del mantillo (horizontes orgánicos).
Descomposición de la material orgánica.	Varios invertebrados soprofiticos y/o que se alimentan del mantillo (detritívoros), hongos, bacterias, actinomicetos y otros microorganismos.
Supresión de pestes, enfermedades y parásitos.	Plantas micorrizas y otros hongos, nematodos, otros invertebrados y bacterias que parasitan o causan enfermedades a patógenos, colémbolos, invertebrados, protozoos y hongos depredadores.
Fuente de alimentos y medicinas.	Raíces de algunas plantas, algunos insectos (grillos, larvas de escarabajos, hormigas, termites), lumbrídeos, vertebrados que habitan en el suelo, microorganismos y sus productos (p. ej. la penicilina).
Relaciones simbióticas y asimbióticas con las raíces de las plantas.	Rizobios, micorrizas, actinomicetos, bacterias diazotrópicas, varias especies de microorganismos rizosféricos y hormigas.
Control del crecimiento de las plantas (que pueden tener efectos positivos o negativos).	<i>Efectos Directos:</i> Sistemas radiculares, rizobios, micorrizas, actinomicetos, patógenos, nematodos fitoparásitos, insectos rizofagos, microorganismos de la rizosfera, agentes que ejercen biocontrol. <i>Efectos Indirectos:</i> la mayor parte de la biota.

1.2.1. MASA MICROBIANA.

La masa microbiana está definida como la parte orgánica del suelo constituida por microorganismos menores de $5-10 \mu\text{m}^3$. Esto incluye microorganismos muy diferentes como bacterias, hongos, levaduras, algas, protozoos etc. Lo normal es que de un 1% a un 3% de la materia orgánica del suelo corresponda a biomasa microbiana.

La diversidad de microorganismos que se encuentran en una fracción de suelo cumple funciones determinantes en la transformación de los componentes orgánicos e inorgánicos que se le incorporan. Esto permite comprender su importancia en la nutrición de las plantas al efectuar procesos de transformación hasta elementos que pueden ser asimilados por sus raíces. La humificación de la materia orgánica es un proceso netamente microbiológico. Además de esto la masa microbiana desempeña funciones tan importante como la oxidación, reducción, precipitación y solubilización de iones minerales, la fijación de nitrógeno atmosférico, el control de los ciclos biogeoquímicos, en particular de los de carbono, nitrógeno, azufre e hierro y la transformación de la roca madre (Gobat *et al.* 2004). Por último la biomasa microbiana tiene un importante papel en la estructura y estabilización del suelo, así como indicador ecológico, ya que responde de forma más rápida y sensible a las variaciones sufridas en la calidad del suelo que la materia orgánica.

La mayor actividad de los microorganismos se realiza desde la superficie del suelo hasta unos 20 centímetros de profundidad. Las colonias de microorganismos permanecen adheridas a las partículas de arcilla y humus (fracción coloidal) y a las raíces de las plantas que les suministran sustancias orgánicas que les sirven de alimento y estimulan su reproducción. Estas exudaciones dependen del buen estado nutricional de la planta y así favorecen el crecimiento de los microorganismos que son importantes para ella. Su actividad y su desarrollo están asociados a la disponibilidad de los sustratos a transformar. La colonización de algunos grupos microbianos sobre las fracciones orgánicas e inorgánicas dependen de la función que se está cumpliendo en la transformación (degradación de carbohidratos o de proteínas, amonificación, nitrificación, oxidación, reducción, mineralización, solubilización). Por lo tanto, mientras algunos microorganismos actúan sobre un sustrato, otros se desarrollan en los productos de la transformación. Cuando terminan su función sobre la degradación del sustrato, los grupos microbianos que estaban actuando principalmente disminuyen al máximo, se reproducen o entran en latencia y se incrementa la población de otros que

cumplirán funciones de transformación en los productos del metabolismo del grupo microbiano anterior. Cada proceso químico desencadenado por un microorganismo es una etapa en la descomposición de un material orgánico o inorgánico. (Delgado, 2004).

La actividad y desarrollo de la masa microbiana está influenciada principalmente por dos factores: la disponibilidad de energía y nutrientes y las condiciones del medio. Sean autótrofas o heterótrofas, todas las bacterias al igual que las plantas necesitan captar una serie de macronutrientes (C, H, O, N, P, S, K, Mg) y micronutrientes (Co, Cu, Zn, Mo...). De la disponibilidad de estos elementos en el medio y la capacidad de competir con otros organismos por estos recursos depende el desarrollo de la masa microbiana. Por otro lado, las condiciones de temperatura, la disponibilidad de agua y oxígeno o el pH son también factores determinantes en la actividad microbiana. Es de esperar por tanto que exista una gran variabilidad espacial y temporal en el comportamiento de la biomasa del suelo relacionada con las condiciones del medio (García *et al.* 2006; Polo 2006).

El interés en el estudio de la biomasa microbiana está relacionado con su función como fuente y sumidero de nutrientes. Tras el proceso de descomposición de la materia orgánica parte de los productos inorgánicos son asimilados por los propios microorganismos para satisfacer sus requerimientos metabólicos mientras que la proporción sobrante es liberada a la solución del suelo y puesta a disposición de las plantas. En determinadas condiciones los microorganismos pueden llegar a competir con las plantas por los recursos disponibles, inmovilizándolos en forma de masa microbiana al crecer sus poblaciones. Posteriormente, cuando los microorganismos mueren, esos recursos pasan de nuevo a disposición de los vegetales. Los ratios C/N y C/P en los microorganismos son bajos comparados con los ratios de las plantas, por lo que la reserva de N y P microbiano supone una cantidad importante del N y P del suelo. Pequeñas fluctuaciones en las poblaciones microbianas pueden ser cruciales para la liberación o inmovilización de N y P especialmente en suelos deficientes en estos nutrientes.

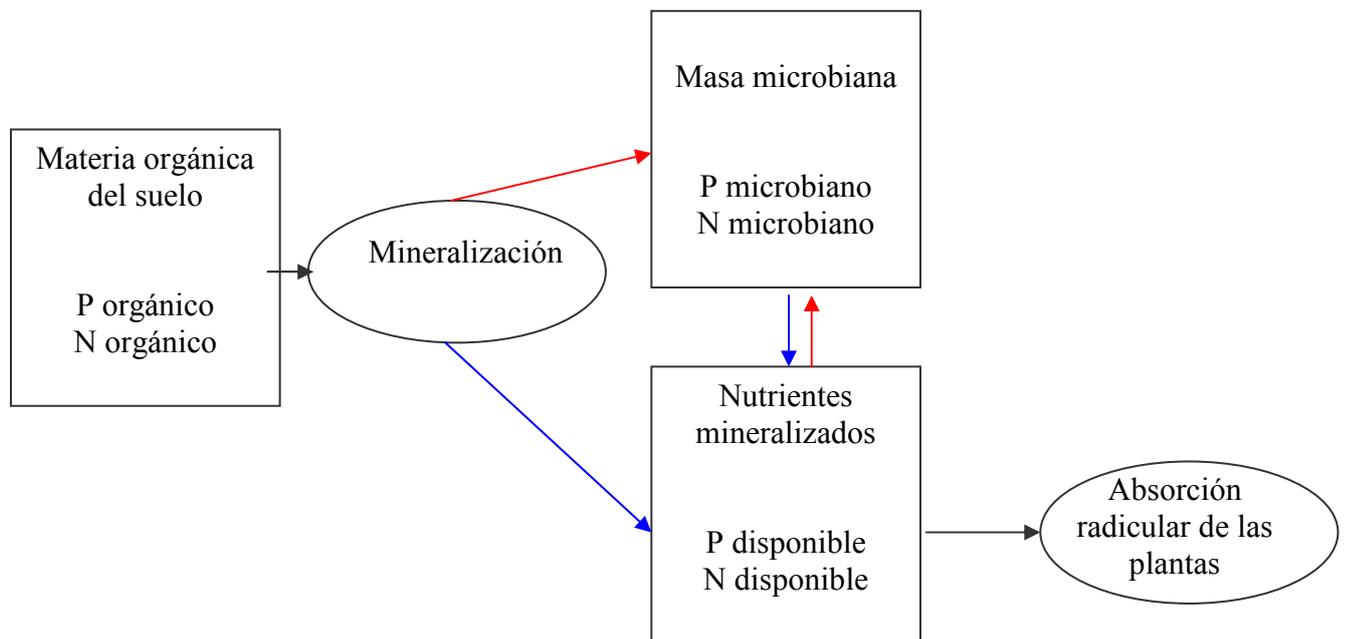


Figura 3.- Relaciones de inmovilización (líneas rojas) y liberación (líneas azules) de nutrientes mineralizados por la masa microbiana a partir de la materia orgánica del suelo.

II. OBJETIVOS.

2. OBJETIVOS.

El presente trabajo fin de carrera se enmarca dentro del proyecto DINAMED (Dinámica del bosque mediterráneo en un escenario de cambio global) (CGL2005-05830-C03-01-BOS) que se lleva a cabo simultáneamente en tres zonas de Andalucía (Sierra Nevada, Sierra de Cardeña y Montoro y el Parque Natural de los Alcornocales) con el objetivo general de estudiar la dinámica del bosque mediterráneo y los procesos que la determinan. El Proyecto está financiado por la CICYT (MEC) durante el trienio 2006-2008, y coordinado por el Dr. Teodoro Marañón.

El estudio que nos ocupa se llevó a cabo en dos parcelas experimentales de bosque mediterráneo, de una hectárea aproximada de extensión, situadas, respectivamente, en el norte y sur del Parque Natural de los Alcornocales, en las provincias de Málaga y Cádiz. Ambas parcelas presentan una cubierta arbórea de alcornoque y quejigo moruno (*Quercus suber* y *Quercus canariensis*), con la particularidad de que la primera, situada en la zona de *La Saucedá* posee una estructura de bosque abierto, con un importante estrato arbóreo-arbustivo mientras que la segunda, situada en el área denominada *San Carlos del Tiradero* presenta un dosel cerrado propio de los bosques más conservados.

En este contexto el objetivo general del trabajo fue estudiar la biomasa microbiana del suelo, fracción de la materia orgánica constituida por microorganismos menores de $5-10\mu^3$, relacionada con la fertilidad del suelo, la descomposición de la materia orgánica, los ciclos biogeoquímicos y la estabilización física de los agregados. En suelos forestales mediterráneos pobres en nutrientes la biomasa microbiana adquiere una gran importancia por su papel como fuente y sumidero de nutrientes. Los microorganismos inmovilizan recursos orgánicos e inorgánicos del suelo que quedan retenidos como material celular. Por otra parte, la muerte y posterior mineralización de estos microorganismos supone la liberación de los nutrientes al suelo, donde quedan disponibles para las plantas. Por tanto, es importante conocer la dinámica de la masa microbiana, pues sus fluctuaciones pueden determinar tanto la inmovilización como el aporte de nutrientes.

El objeto principal del trabajo fue estudiar la dinámica estacional de los nutrientes retenidos en la biomasa microbiana y relacionarlas con el tipo de cubierta

vegetal (dosel arbóreo de *Q. suber* y *Q. canariensis*, cubierta de matorral y zonas de claro) y las características físico-químicas del suelo. En particular se investigará la variación en la inmovilización en forma de masa microbiana de fósforo y nitrógeno inorgánico, nutrientes esenciales para la vegetación y a menudo limitantes en ambientes forestales mediterráneos.

Los objetivos particulares fueron:

1. Cuantificar la concentración de N y P microbiano así como de P disponible y NH_4^+ existente en el suelo de seis microsítios caracterizados por presentar una cubierta vegetal significativamente diferente, cuatro de ellos en la parcela de *Panera* y dos en la de *Tiradero*. En cada microsítio se tomaron muestras superficiales (0-8 cm) y subsuperficiales (8-16 cm).
2. Comparar estadísticamente los valores de las variables estudiadas en los distintos tipos de microsítios e interpretar las diferencias encontradas.
3. Analizar la variación temporal de los parámetros estudiados en dos estaciones consecutivas (primavera y verano).
4. Relacionar las concentraciones observadas de los distintos elementos de origen microbiano con otras características del suelo (materia orgánica, humedad, pH, nitrógeno total y textura) y, en su caso, identificar tendencias globales de variación.

III. MATERIAL Y MÉTODOS.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1. DESCRIPCIÓN ÁREA GENERAL DE ESTUDIO.

3.1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

El área de estudio se encuentra dentro de El Parque Natural de Los Alcornocales, declarado como espacio protegido de la Comunidad Autónoma Andaluza por la ley 2/89 (BOJA 27/07/89).

Se extiende a través de una gran franja de coordenadas 36° 03' - 36° 45' Norte y 5° 20' - 5° 45' Oeste con orientación Sur-Norte entre la zona costera de Tarifa, en el mismo Estrecho de Gibraltar, hasta las sierras del interior, en los municipios de Cortes de la Frontera, Ubrique y El Bosque (Parque Natural de la Sierra de Grazalema). Al Oeste limita con la campiña gaditana, al Suroeste, con la Depresión de la Janda y la Sierra de Fates y al Sureste y Este con el valle del Río Guadiaro.

La mayor parte del Parque Natural pertenece a la provincia de Cádiz y sólo una pequeña parte a la provincia de Málaga. Con una superficie 167.767 ha, es el tercer espacio natural protegido más grande de Andalucía.

3.1.2. MEDIO FÍSICO.

El relieve es accidentado y con fuertes pendientes, con alturas que no superan en general los 900m (exceptuando el Pico del Aljibe, también conocido como Pilita de la Reina, con 1092 m de altitud s.n.m.), aportándole al conjunto un fuerte aire agreste que destaca de las suaves lomas y llanuras circundantes así como del propio nivel del mar (Blanco *et al.*, 1991).

3.1.2.1. Geología.

El Parque Natural de Los Alcornocales se localiza en el extremo occidental de la Cordillera Bética, geológicamente se puede decir que ésta, junto con las cordilleras norteafricanas del Rif y el Tell, conforman una sola unidad (Didon, 1969). Este sistema Bético-Rifeño ocupa el sector más meridional de la Península Ibérica. Se trata de una

región inestable, afectada durante parte del Mesozoico y gran parte del Terciario por fenómenos tectónicos mayores.

La geología dominante está formada por areniscas oligo-miocénicas (Unidad del Aljibe), con alternancia de margas y arcillas en las zonas más bajas y presencia de afloramientos calizos dispersos (Gavala, 1929; Fontboté, 1983, 1986). Esta variabilidad geológica, junto a las variaciones geomorfológicas y microclimáticas que posee el Parque (temperatura, humedad e insolación) originan una considerable variabilidad de suelos (Bellinfante *et al.*, 1997; Jordán *et al.*, 1997). Entre los suelos más representativos del Parque Natural de Los Alcornocales destacan:

Leptosoles: poco evolucionados y muy delgados (espesor menor de 25 cm). Se localizan en zonas de pendientes elevadas y/o expuestas a la erosión.

Cambisoles: más evolucionados que los anteriores, con un perfil de tipo ABw-C, bien diferenciado.

Luvisoles: suelos evolucionados, profundos y con un perfil bien diferenciado de tipo A-Bt-C o A-E-Bt-C. Aunque en general se encuentran en zonas poco inclinadas y poco afectadas por la erosión, en el área de estudio es posible encontrarlos con frecuencia en laderas de pendiente más elevada pero con una vegetación densa y bien conservada.

Alisoles: suelos minerales en cuya génesis no ha habido influencia humana. En ellos se ha llevado a cabo un proceso de lavado importante. El horizonte A, pobre en materia orgánica, suele presentar una baja actividad biológica; son suelos poco permeables y sin una estructura bien desarrollada. El contenido en nutrientes es generalmente bajo. Su elevado contenido en aluminio es causante de toxicidad para las plantas.

Regosoles: desarrollados sobre materiales no consolidados y que presentan una escasa evolución; se generan a partir de aportes coluviales, localizándose normalmente en el final de las laderas y el piedemonte de las sierras.

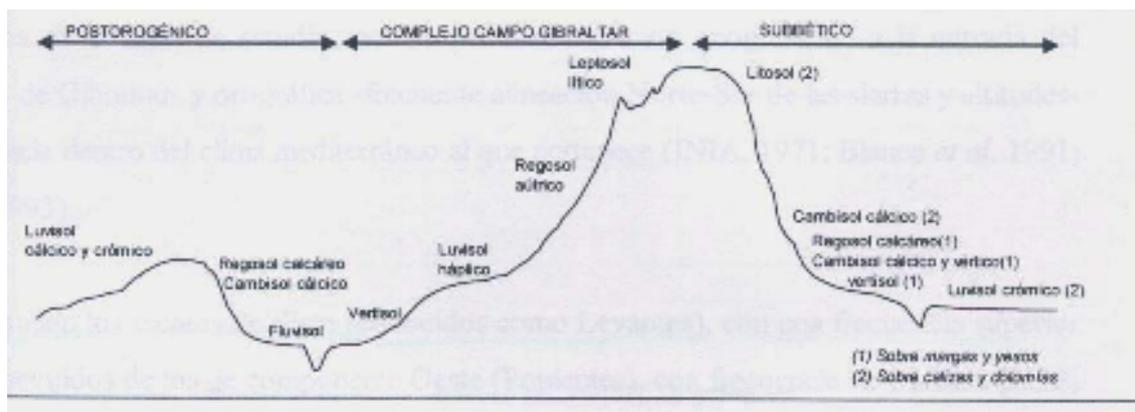


Figura 3.- Representación esquemática de los distintos tipos de suelos presentes en el Parque Natural Los Alcornocales. Fuente: Página Web de la Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

3.1.2.2. Hidrografía.

El área de estudio participa de dos grandes cuencas hidrográficas:

- Cuenca Atlántica: la mitad occidental de las Sierras del Aljibe, Blanquilla y del Niño, y la mitad sur de las Sierras de Ojén, de la Monja y de Fates están drenadas por ríos que vierten sus aguas al Océano Atlántico, siendo los principales el Barbate, Guadalete y el Jara.
- Cuenca Mediterránea: dos terceras partes de la zona que nos ocupa son drenadas hacia el Mar Mediterráneo por medio de una amplia red de cursos de aguas que se agrupan en tres ríos importantes: Hozgarganta (afluente del río Guadiaro), Guadarranque y río de las Cañas o Palmones.

Respecto a la hidrología subterránea, la aportación total supone un 13% el caudal superficial. Los acuíferos se distribuyen superpuestos a diversos niveles (parcialmente desconectados entre sí) dando lugar a numerosos puntos de rezume dispuestos en diferentes cotas. Esto es debido a los grandes paquetes de estratos de areniscas silíceas de baja permeabilidad situados a diferentes alturas sobre el nivel impermeable de la Unidad, representado por las Arcillas de Base del Aljibe (Coca, 2001). El agua discurre a través de la porosidad de las capas de areniscas hasta llegar a las capas inferiores de arcillas impermeables. Todo ello determina una hidrología superficial densa, de escaso caudal y marcadamente estacional.

3.1.2.3. Clima.

El clima es de tipo mediterráneo subtropical y marítimo, caracterizado por precipitaciones abundantes. Sus sistemas montañosos, frecuentemente alineados en dirección Norte-Sur, actúan de barrera al ser el primer obstáculo que encuentran las masas de aire frío procedentes del Atlántico, que se ven obligadas a elevarse en altura, enfriándose entonces por expansión adiabática y dando lugar a lluvias persistentes en toda la zona. Este fenómeno hace que la pluviometría sea muy elevada, con precipitaciones medias anuales que oscilan entre 763 y 1180 mm., según la cercanía al mar y la influencia del relieve montañoso (Torres, 1995).

La temperatura media anual está en torno a los 15,7° C, alcanzándose los máximos en los meses de verano (entre 22 y 26° C); no obstante son registros moderados si se comparan con los valores normales del clima mediterráneo. Los valores medios invernales están entre los 7 y los 10° C. Las heladas son prácticamente inexistentes.

3.1.2.4. Vientos.

Predominan los vientos cálidos y secos del Este (conocidos como “levantes”), seguidos de los vientos frescos y húmedos del Oeste (“ponientes”), responsables de la mayor parte de las precipitaciones. Los vientos de levante vienen ligeramente cargados de humedad tras su paso por el Mediterráneo, provocando nubes de estancamiento en las cumbres que determinan la presencia de nieblas espesas y persistentes (localmente conocidas como “Barbas del Levante”), al entrar en contacto con el continente y verse obligados a ascender a través de las sierras. Este fenómeno es de vital importancia para las plantas, pues supone una importante compensación hídrica que contribuye a suavizar los estragos de la sequía estival.

La regularidad de los vientos y las altas velocidades que alcanzan, debido principalmente al “efecto Venturi” producido por la cordilleras Béticas y Rifeñas, hacen que exista un gran potencial para el aprovechamiento de este recurso mediante parques eólicos, aunque por su incidencia sobre el paisaje y las grandes aves en sus rutas migratorias, es un tipo de infraestructura que se convierte en factor de riesgo para tales recursos.

En último lugar, el régimen de vientos incide directamente sobre la vegetación, haciendo que ésta esté menos desarrollada, especialmente en zonas de vientos e levante.

3.1.3. MEDIO BIÓTICO.

3.1.3.1. Vegetación.

El interés botánico del área de estudio proviene de sus peculiares condiciones orográficas, climáticas y edáficas, así como del buen estado de conservación en que se encuentra la cubierta vegetal.

La comunidad vegetal más ampliamente representada es el bosque puro, entendiéndose como tal aquel que tiene una única especie de porte arbóreo que ocupa más del 80% del área. Dentro de esta unidad, la especie más abundante es el alcornoque (*Quercus suber*), seguida del quejigo andaluz (*Quercus canariensis*), pinares de repoblación de pino negral (*Pinus pinaster*) y pino piñonero (*Pinus pinea*), principalmente, acebuche (*Olea europea* var. *Sylvestris*) y encina (*Quercus ilex* subsp. *Bellota*), por orden de extensión en el territorio.

La siguiente unidad en cuanto a extensión es el bosque mixto, siendo el bosque mixto de alcornoque y quejigo la formación más abundante. La tercera unidad en importancia es el oquedal, considerado estructura adhesionada cuando la cubierta oscila entre el 10 y el 20% del área, siendo el oquedal puro la formación más abundante. La especie más abundante en esta unidad es el alcornoque, seguido de quejigo andaluz.

Otras unidades con representación, por orden de extensión, son el matorral, siendo el matorral bajo denso el más abundante, el pastizal, con el pastizal bajo como el más importante, y el oquedal mixto. El resto del espacio está ocupado por otras formaciones de menor importancia en cuanto a la superficie ocupada.

3.1.4. APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS.

Hoy día, los principales aprovechamientos forestales del Parque Natural Los Alcornocales son: la caza, la ganadería y la extracción del corcho de los alcornoques.

En la actualidad, el aprovechamiento cinegético es uno de los recursos más importantes del área de estudio. Es tal la relevancia que ha llegado a adquirir que se ha convertido en el aprovechamiento principal de muchas fincas, dejando en segundo plano a otros, como el ganadero. Así, los espacios declarados como “cotos de caza” ocupan hoy día más del 85% de la superficie total del Parque; de éstos, alrededor del 70% han sido cercados con malla cinegética (Anónimo, 2005). El ciervo (*Cervus elaphus*), el gamo (*Dama dama*) y el muflón (*Ovis orientalis*) son los animales más demandados para la caza mayor, mientras que para la caza menor se aprovechan perdices, conejos y, sobre todo, especies de aves migratorias (fundamentalmente zorzales).

La explotación ganadera más generalizada es la vacuna (especialmente de la raza *Retinta*), quedando los ganados caprino y porcino relegados a pequeñas áreas concretas, debido al retroceso generalizado que sufrieron por el inicio del aprovechamiento de la caza mayor y los daños ocasionados por la peste porcina, respectivamente (Coca, 1999).

Pero, sin lugar a dudas, el aprovechamiento con mayor interés del Parque es la obtención del corcho de los alcornoques, con una producción media anual de 16 toneladas, que supone el 31% de la producción española y el 8% de la mundial aproximadamente (Anónimo, 2005). Esta actividad, que viene llevándose a cabo desde mediados del siglo XIX, tiene como principal objetivo la producción del tapón de corcho. La saca de corcho se lleva a cabo con una periodicidad aproximada de nueve años, que puede variar en un rango de ocho a once años, de acuerdo con la climatología.

Otros aprovechamientos minoritarios que también son llevados a cabo dentro del Parque son: obtención de madera y leña de algunas especies de árboles, apicultura, extracción de cepas de *Erica arborea* para la fabricación de pipas y cachimbas, corta de ramas (*tarama*) de *Erica scoparia* para la fabricación de bardos y sombrajos, y recolección de setas, piñas, espárragos o tagarninas, entre otros.

3.2. DESCRIPCIÓN ESPECIES DE ESTUDIO.

A continuación se detalla una descripción botánico-ecológica de las principales especies leñosas en el área de estudio, las cuales han sido clasificadas en tres grandes grupos:

- A) Quercíneas (*Quercus suber* y *Quercus canariensis*).
- B) Lianas o trepadoras (*Hedera helix* y *Smilax aspera*).

C) Otras especies arbustivas o arborescentes (*Arbutus unedo*, *Erica arborea*, *Erica scoparia*, *Genista linifolia*, *Phillyrea latifolia*, *Pistacia lentiscus* y *Viburnum tinus*). Para la descripción botánica de las diferentes especies, se ha utilizado la información recogida en: Valdés *et al.* (1987), Romo (1997) y Coca (2001).

3.2.1. QUERCÍNEAS.

3.2.1.1. *Quercus suber* L.

Especie clave en el área de estudio, ocupa aproximadamente el 48% de la superficie total del Parque Natural Los Alcornocales (Torres, 1995; Anónimo, 2005). Esta especie se ha visto favorecida tanto por las particulares condiciones ambientales que presenta la zona como por la intervención del hombre, consecuencia de su enorme importancia económica en la industria del corcho.



Imagen 1.- *Quercus suber* L.

Quercus suber L. (1753) es un endemismo de la región mediterránea occidental, favorecido por la influencia del Atlántico, que suaviza las grandes oscilaciones térmicas y la elevada aridez estival características del clima mediterráneo. En la Península Ibérica presenta una distribución muy importante, con una extensión que asciende a algo más 2.500.000 ha (sobre todo en la mitad suroccidental de Portugal, Andalucía y Extremadura), que supone aproximadamente casi la mitad de su distribución mundial.

Pertenciente a la familia de las Fagáceas, es un árbol de porte medio, generalmente con una altura comprendida entre 15 y 20 metros, que rara vez supera los 25 metros. La corteza, lisa en las ramas más jóvenes, se va agrietando profundamente con la edad dando lugar a una cubierta espesa de corcho gris, producida por la capa de felógeno, con profundas grietas longitudinales. Cuando el corcho se separa, la corteza presenta un tono rojo violáceo. El considerable espesor que puede alcanzar la corteza suberosa y la facultad para regenerar esta capa generadora de corcho, cuando estos órganos se despojan del revestimiento protector, son precisamente las principales características que distinguen al alcornoque de las demás especies de *Quercus* (Vieira Natividade, 1950).

El sistema radical es vigoroso y profundo, proporcionándole al árbol un sistema de anclaje seguro frente a los fuertes vientos y los suelos ligeros en los que suele crecer. La raíz está compuesta por un eje central pivotante y una amplia red de raíces secundarias muy robustas, capaces de alcanzar una gran expansión horizontal, característica de los xerófitos.

Las hojas son alternas, coriáceas y altamente heteromórficas, generalmente ovado-lanceoladas u oblongas, de base asimétrica, obtusas y ligeramente denticuladas. En el envés aparecen revestidas de un denso tomento blanquecino, mientras que en el haz son glabras o con algunos pelos dispersos y estrellados, más densos cerca de la base del nervio principal. Las hojas generalmente persisten de uno a tres años y, a pesar de su hábito perennifolio, el árbol suele desprenderse de gran parte de ellas cuando llega el verano, como mecanismo fisiológico de tolerancia frente a la sequía estival (Navarro *et al.*, 2004).

Se trata de una especie monoica, cuyo período de floración se produce en primavera, generalmente entre los meses de marzo y mayo. La polinización, al igual que ocurre en todas las especies de su género, es anemófila.

3.2.1.2. *Quercus canariensis* Willd.

El quejigo moruno o quejigo africano (*Quercus canariensis* Willd.) es una especie endémica del Magreb y la Península Ibérica. En esta última presenta un área muy fragmentada, apareciendo en la cordillera litoral catalana, Sierra Morena, Montes de Toledo y sur de Portugal, aunque sin lugar a dudas las poblaciones más importantes se encuentran en las serranías gaditanas y malagueñas. Esta especie de Fagácea es localmente abundante en las zonas más húmedas y umbrías del Parque Natural Los Alcornocales, donde frecuentemente se entremezcla con el alcornoque formando bosques mixtos de alcornocal – quejigar (Torres, 1995; Coca, 1999; Ojeda *et al.*, 2000; Díaz-Villa *et al.*, 2003; Urbieta *et al.*, 2004).



Imagen 2.- *Quercus canariensis* Willd.

Se trata de un árbol de porte mediano, aunque excepcionalmente puede alcanzar los 30 metros de altura, con una copa amplia y densa, de forma generalmente ovada o redondeada. El tronco es recio y robusto, con una corteza rugosa de color pardo

grisáceo o gris ceniza, resquebrajada longitudinal y transversalmente. Los tallos jóvenes son muy tomentosos, ofreciendo una ramificación amplia y extendida.

Las hojas, son alternas y algo coriáceas, aunque en menor medida que en el caso del alcornoque. Su forma es generalmente lanceolada, elíptica u oblonga, más o menos profundamente lobulada (con lóbulos cortos, dentados o subagudos), o con borde sinuado. Las hojas son aterciopeladas por ambas caras al nacer, aunque pronto se vuelven glabras y brillantes por el haz, quedando tan sólo tomentosas y glaucas por el envés, con pelos flocosos limitados a los nervios. Esta especie tiene además la particularidad de poseer hojas con hábito marcescente, que es un tipo de estrategia parecida a la caducifolia, pero en este caso las hojas se mantienen secas en el árbol durante un cierto período de tiempo antes de desprenderse. Por ello, aparecen dos picos importantes en la caída de hojas al suelo: uno en otoño, debido a su carácter semicaducifolio, y otro en verano, siguiendo el mismo tipo de estrategia foliar frente a la sequía que presenta el alcornoque (Navarro *et al.*, 2004).

El período de floración va de febrero a mayo. Se trata de una planta monoica, es decir, con flores unisexuales masculinas y femeninas reunidas en la misma planta. El período de fructificación es más temprano que en el caso del alcornoque, prolongándose desde principios de septiembre hasta finales del mes de diciembre. En este caso, las bellotas también son morfológicamente muy variables y, generalmente, de tamaño menor en comparación con *Q. suber*. Los procesos de polinización y dispersión de semillas son idénticos al caso del alcornoque. La reproducción del quejigo presenta también una fuerte variación interanual, con años de gran producción de frutos y otros años de baja o nula producción.

3.2.2. TREPADORAS O LIANAS

3.2.2.1. *Hedera helix L.*

La hiedra, perteneciente a la familia de las Araliáceas, en el Parque Natural Los Alcornocales abunda en canutos, quejigares y alcornocales umbríos (Coca, 1999).



Imagen 3.- *Hedera helix L.*

Se trata de un arbusto trepador, que es capaz de adherirse a los más variados soportes. Las hojas son alternas, coriáceas, perennes, glabras y largamente pecioladas. Las de las ramas fértiles presentan una morfología romboidal, mientras que las de las ramas estériles adoptan una forma palmeada. El período de floración es en otoño, desde septiembre a diciembre. Las flores son hermafroditas. La polinización es a través de insectos. Los frutos son bayas globosas.

3.2.2.2. *Smilax aspera* L.

Conocida vulgarmente como zarzaparrilla, esta especie de liana perteneciente a la familia de las Esmilacáceas, es muy frecuente en todo el área de estudio, preferentemente en el borde de los arroyos, en el sotobosque de alcornoques y quejigares, así como formando parte del matorral colonizador de suelos arcillosos y margosos (Coca, 1999).



Imagen 4.- *Smilax aspera* L.

Se trata de un arbusto trepador rizomatoso, con tallos volubles y espinosos de hasta 10 m. Las hojas son alternas, coriáceas, perennes y pecioladas. Su forma es generalmente acorazonada y a veces provista de espinas en los márgenes y en el nervio medio del envés. En la base de los pecíolos nacen uno o dos zarcillos estipulares, de los cuales la planta se ayuda para trepar. Especie dioica. La floración tiene lugar durante el otoño, en los meses de septiembre a noviembre. La polinización es entomófila. Los frutos son bayas esféricas de color negro o rojizo. El período de fructificación coincide con el de floración.

3.2.3. OTRAS ESPECIES ARBUSTIVAS O ARBORESCENTES.

3.2.3.1. *Arbutus unedo* L.

Conocido vulgarmente como madroño (perteneciente a la familia de las Ericáceas), es fácil encontrarlos en bordes de arroyos de curso medio, en



Imagen 5.- *Arbutus unedo* L.

zonas con una capa freática cercana a la superficie y en laderas de umbría, formando parte tanto del sotobosque de alcornocal como del matorral.

Son arbustos o arbolillos que pueden alcanzar hasta 10 metros de altura, aunque generalmente no superan los 7 m. El tronco presenta una corteza escamosa de color pardo rojizo o pardo grisáceo, que se desprende en tiras longitudinales. Los brotes jóvenes son rojizos, ásperos y pubescentes. Las hojas son simples, enteras, perennes, algo coriáceas, de disposición alterna y cortamente pedunculadas. El período de floración va desde octubre hasta febrero. Las flores son hermafroditas. Su fruto se presenta en forma de baya globosa de color anaranjado o rojizo, y fuertemente verrugoso.

3.2.3.2. *Erica arborea* L.

La subfamilia *Ericoideae* (familia *Ericaceae*), a la cual pertenecen las dos especies de *Erica* estudiadas en el presente trabajo. En el Parque Natural Los Alcornocales, *Erica arborea* aparece con más frecuencia en hábitats con densa cobertura vegetal, formando parte tanto del matorral colonizador de laderas de umbría, como del sotobosque de alcornocal y quejigar resguardado de la solana (Ojeda *et al.*, 2000).



Imagen 6.- *Erica arborea* L.

Son arbustos que pueden llegar a alcanzar hasta 6 m de altura, con ramas blanquecinas y densamente pubescentes, cubiertas de pelos patentes y escabros. Las hojas son generalmente tetraverticiladas, lineares, persistentes, revolutas (con el margen doblado hacia el envés) y glabras. La floración ocurre durante la primavera, generalmente desde febrero hasta abril. Las flores son hermafroditas. La polinización es entomófila. El período de fructificación coincide con el de floración. El fruto es de tipo cápsula.

3.2.3.3. *Genista linifolia* L.

Pertenciente a la familia de las Fabáceas, esta especie, también llamada Teline linifolia. En los bosques de estudio, aparece con relativa frecuencia sobre areniscas, formando parte del matorral y de sotobosques más degradados de alcornocal (Coca, 1999).



Imagen 7.- *Genista linifolia* L.

Son arbustos inermes de hasta 2 metros de altura, con ramas angulosas (las jóvenes velutinas). Las hojas son trifoliadas, con disposición alterna y sin pecíolos. Los foliolos son lineares, revolutos, obtusos o agudos, con el envés blanquecino y densamente piloso. Las flores son hermafroditas. El proceso de polinización está mediado por insectos. El fruto es una legumbre recta, comprimida lateralmente, que aparece totalmente cubierta por pelos. Tanto el período de floración como el de fructificación tienen lugar durante la primavera, entre los meses de marzo y mayo.

3.2.3.4. *Phillyrea latifolia* L.

También conocida como agracejo o labiérnago prieto, se trata de una especie perteneciente a la familia de las Oleáceas. En el área de estudio es relativamente frecuente, apareciendo tanto sobre areniscas como en suelos más arcillosos o margosos (Coca, 1999).



Imagen 8.- *Phillyrea latifolia* L.

Se trata de un arbusto o arbolillo que puede llegar a alcanzar los 8 m de altura, con una corteza de color gris y lisa al principio, que se va agrietando ligeramente con la edad. Las ramas jóvenes y las yemas presentan un tomento pulverulento. Las hojas, son simples, opuestas, persistentes, algo coriáceas y con una morfología muy variable: de ovadas a lanceoladas, con el margen serrado y dientes más o menos distanciados. El color es verde intenso por el haz y verde claro por el envés. El período de floración va de febrero a abril. Se trata de una especie funcionalmente androdioica (Herrera *et al.* 1994). El sistema de polinización es a través del viento (Herrera *et al.*, 1994). El fruto es una drupa de 6-8 mm, globosa, obtusa, no aristada y generalmente provista de una o dos semillas en su interior.

3.2.3.5. *Pistacia lentiscus* L.

El lentisco, perteneciente a la familia de las Anacardiáceas, en el Parque Natural los Alcornocales aparece preferentemente sobre suelos arcillosos o margosos, formando parte de la comunidad del acebuchal, o en zonas de contacto acebuchalalcornocal (Coca, 1999).



Imagen 9.- *Pistacia lentiscus* L.

Se trata de una planta generalmente de porte arbustivo que no supera los 2 m, aunque a veces puede aparecer en forma de arbolillo pudiendo llegar a alcanzar hasta 8 m de altura. La copa es densa y muy ramificada. La corteza es lisa y grisácea, aunque con el tiempo se va agrietando y oscureciendo. Las hojas son alternas, persistentes, algo coriáceas y paripinnadas, compuestas de dos a diez foliolos. El color de las hojas es verde brillante por el haz y verde claro por el envés. Se trata de una especie dioica, es decir, con sexos separados en individuos diferentes. El fruto es una drupa glabra, globosa y apiculada, de unos 4 mm, que presenta un color rojizo cuando está inmaduro que se va tornando hasta pardo o negro a medida que va completando su maduración.

3.2.3.6. *Viburnum tinus* L.

Conocido vulgarmente como durillo, este arbusto perteneciente a la familia de las Caprifoliáceas aparece con relativa frecuencia en los bordes de cursos de agua y “canutos”, así como formando parte del sotobosque de quejigares y alcornocales bien conservados (Coca, 1999).



Imagen 10.- *Viburnum tinus* L.

Se trata de un arbusto o pequeño arbolillo que normalmente no supera los 7 m de altura. Los tallos son angulosos, al menos en las ramas más jóvenes, y pubescentes en la parte superior. Las hojas son opuestas, coriáceas, perennes. El período de floración tiene lugar desde mediados de invierno hasta entrada la primavera, generalmente desde enero hasta abril. Las flores son hermafroditas y son polinizadas por insectos. El fruto es una

drupa ovoidea, con una coloración azul metalizada, que madura a finales de verano – principios de otoño.

3.3. DESCRIPCIÓN SITIOS EXPERIMENTALES DEL BOSQUE.

3.3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.

Los diferentes estudios se han llevado a cabo en dos sitios experimentales de bosque, localizados en las fincas de *Tiradero* y *Panera*, dentro de los límites del Parque Natural Los Alcornocales (*Figura 4*).



Figura 4.- Mapa de localización geográfica del área de estudio.

En cada uno de estos sitios de bosque se delimitó una parcela experimental de 1 hectárea aproximadamente, que fue cercada con malla cinegética a finales de 1999 – principios del 2000, para evitar la interferencia del ganado y los ungulados silvestres. La parcela experimental de *Tiradero*, localizada en la mitad sur del Parque ($36^{\circ} 9' 46''$ N, $5^{\circ} 35' 39''$ W), se encuentra ubicada en la ladera este del cerro de “Los Gándalos”, próxima a un cauce de agua transitorio que desemboca en el arroyo del “Tiradero”, afluente del Palmones (*Figura 5*).

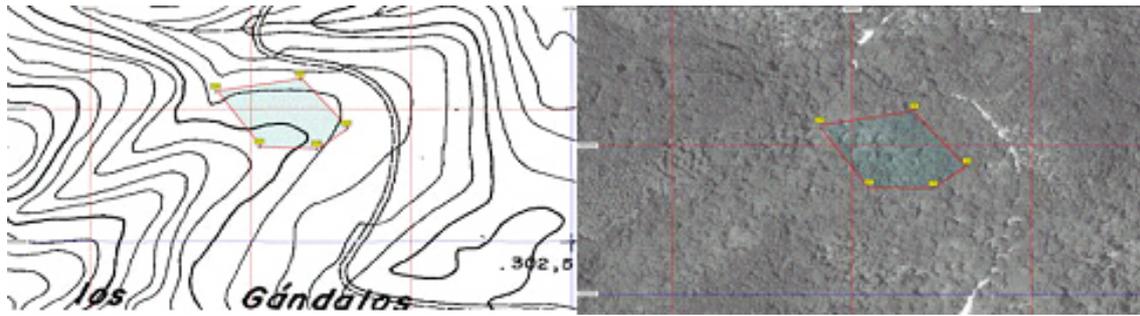


Figura 5.- Mapa topográfico y ortofoto aérea experimentales de bosque *Tiradero*. Con línea roja y entramado verde se ha delimitado el cercado experimental de 1 ha.

El sitio de bosque de *Panera* se encuentra situado al norte del Parque ($36^{\circ} 31' 54''\text{N}$, $5^{\circ} 34' 29''\text{W}$), en la ladera noroeste de una serie de picos que forman parte de “La Loma del puerto del Lentisco”, próxima a un cauce de agua transitorio que desemboca en “La Garganta de La Saucedá” y, posteriormente, en el río Hozgarganta (afluente del Guadiaro) (Figura 6).

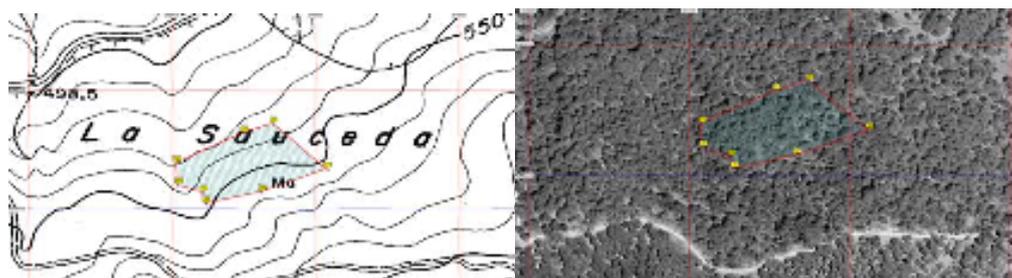


Figura 6.- Mapa topográfico y ortofoto aérea experimentales de bosque *Panera*. Con línea roja y entramado verde se ha delimitado el cercado experimental de 1 ha.

3.3.2. DESCRIPCIÓN GEOMORFOEDÁFICA Y AMBIENTAL.

Los dos sitios de bosque estudiados presentan una posición diferencial en la ladera, con unos valores de altitud y pendiente muy variables. *Tiradero* se encuentra en una posición más baja (a unos 240 m de la cima), con orientación noreste y unos valores de altitud comprendidos entre 335 y 360 m sobre el nivel del mar. El nivel de pendiente es muy heterogéneo, oscilando entre el 15 y el 20%. *Panera* se localiza a mayor altitud (530 – 560 m), ocupando una posición intermedia dentro de la ladera (a unos 100 m de la cima), con orientación noroeste. La pendiente es mayoritariamente fuerte, con valores que oscilan entre el 20 y el 25%.

La localización geográfica, así como la altitud y su posición en la ladera, determinan las características climatológicas de cada uno de los sitios de bosque estudiados (*Tabla 2*). Por un lado, tanto. En *Panera* se recogen las temperaturas más bajas por encontrarse a mayor altura y estar localizada en un punto más interior del Parque siendo la temperatura media anual como la del mes más frío más de 1° C más frías que en *Tiradero*. En cambio, en *Tiradero* las temperaturas son más suaves, fruto de su menor altitud y su mayor proximidad al mar. Por otro lado, probablemente como consecuencia de estas mismas características diferenciales, el nivel de precipitaciones fue más elevado, durante las cuatro estaciones del año, en el sitio de bosque de *Panera* (*Tabla 2*).

Respecto a la litología, los materiales geológicos que aparecen en ambos sitios de bosque son básicamente areniscas del Aljibe, del período Oligoceno-Mioceno. En *Tiradero* pueden reconocerse también algunos materiales de deslizamiento de areniscas del Cuaternario, mientras que en *Panera* son frecuentes algunas manchas con afloramientos de arcillas del Holoceno (Jordán, 2000; Noejovich & Marañón, 2002).

Tabla 2.- Datos climatológicos de precipitación y temperatura en los dos sitios experimentales de bosque. Los datos fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM, datos no publicados), como una interpolación de la información registrada en las diferentes estaciones meteorológicas, desde el año 1971 hasta el 2000. El grado de resolución espacial fue de 1 km (Urbieta, datos inéditos).

	TIRADERO	PANERA
Precipitación (mm)		
Primavera	216,80	258,90
Verano	21,06	27,96
Otoño	262,28	319,18
Invierno	472,18	526,40
Media anual	964,50	1117,59
Temperatura (°C)		
Mes más cálido	23,39	23,56
Mes más frío	10,86	9,06
Media anual	16,58	15,48

3.3.2.1. Vegetación.

El dosel arbóreo de ambos rodales de bosque estudiados está dominado mayoritariamente por *Quercus suber* (alcornoque) que es precisamente la especie arbórea que da nombre al espacio natural protegido - Parque Natural Los Alcornocales.

Tiradero es el rodal de bosque más maduro, presentando un elevado número de árboles de gran porte. Se trata de un bosque mixto con alto grado de conservación, dominado por extensas masas de alcornoque de gran tamaño entremezclados con individuos de quejigo moruno (*Quercus canariensis*), generalmente de menor porte. Entre los arbustos arborescentes, dominan el agracejo (*Phillyrea latifolia*) y el durillo (*Viburnum tinus*). En el suelo del sotobosque y, generalmente trepando en torno al tronco de muchos alcornoques y quejigos, son muy frecuentes algunas especies de lianas típicas de zonas más umbrías, como es el caso de la zarza (*Rubus ulmifolius*), la hiedra (*Hedera helix*) o la zarzaparrilla (*Smilax aspera*).

Panera es un rodal representativo de bosques abiertos y algo adhesados, presentando una menor densidad de árboles, aunque de elevado porte. El dosel arbóreo está codominado por las dos especies de quercíneas, aunque es mayoritario el alcornoque. Entre las especies arbustivas, destacan: *Phillyrea latifolia*, *Genista linifolia*, *Pistacia lentiscus* y *Erica arborea*. En la vegetación del sotobosque es muy frecuente encontrar a la zarzaparrilla, protegida bajo algún árbol o trepando a través de las ramas de otras especies de matorral. En las zonas más aclaradas son abundantes otras leñosas más heliófilas, como *Phlomis purpurea* o *Cistus salvifolius*, generalmente acompañadas de una alta densidad de herbáceas típicas de pastizal.

3.3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TOMA DE MUESTRAS.

La recogida de muestras de los suelos se llevó a cabo entre mayo y septiembre de 2008. Se seleccionaron hasta cuatro tipos de microsítios de muestreo distintos, los cuales se nombraron en función de su cobertura vegetal, significativamente diferente. Existieron dos microsítios que correspondieron justo a la zona situada debajo de cada uno de los árboles seleccionados, zonas bajo *Quercus suber* y zonas bajo *Quercus canariensis*. Existieron zonas de alta cobertura de sotobosque, zonas de matorral y por último, lugares que carecieron de cubierta vegetal leñosa significativa, zonas de claro.

Panera al ser una parcela más abierta y heterogénea presentó los cuatro micrositios posibles, *Tiradero* sin embargo al tratarse de una parcela más cerrada tan sólo presentó dos de los micrositios posibles, correspondientes a las zonas bajo árboles.

Se tomaron 10 muestras por cada tipo de micrositio, a dos profundidades (0-8 y 8-16 cm), haciendo uso de una barrena cilíndrica (tipo “media caña”) de 3 cm de diámetro inferior. En cada punto se tomaron varias submuestras distribuidas al azar, sobre una superficie de aproximadamente cuatro metros cuadrados y se mezclaron las submuestras correspondientes al mismo intervalo de profundidad para obtener una muestra-mezcla homogénea representativa de cada punto. El muestreo se repitió en primavera y verano con el fin de conocer la dinámica temporal de la retención-liberación de nutrientes por parte de la biomasa microbiana.

A la vez que se extrajeron las muestras de suelo se midió la humedad en el campo, para lo que se utilizó un medidor de humedad de tierra TDR-100, aparato que detecta la humedad del suelo en porcentaje absoluto. Se realizaron varias mediciones en cada punto de muestreo para realizar posteriormente una media de los datos obtenidos y obtener un valor representativo.



Imagen 11.- Barrena de media caña.



Imagen 12.- Recogida muestras.

Las muestras frescas de suelo fueron recogidas en bolsas de plástico y trasladadas hasta el laboratorio en frío, cuyo objetivo era mantener con vida la microfauna del suelo. Posteriormente se tamizaron hasta un tamaño máximo de 2 mm.



Imagen 13.- Muestra tamizada a 2mm.

En cada una de las muestras de suelo se determinó el contenido de humedad y de materia orgánica. Además, empleando el método de la fumigación de fumigación-extracción (Vance *et al.* 1987) se han estimado los contenidos de nitrógeno y fósforo microbiano, y se han determinado las concentraciones de amonio en el suelo y fósforo inorgánico disponible en el suelo, esta última mediante el método de Olsen (Olsen *et al.* 1954) que emplea NaHCO_3 como extractante y el método de Bray 1 (Bray y Kurtz 1945) que emplea $\text{NH}_4\text{F-HCL}$.

3.3.4. DETERMINACIONES ANALÍTICAS.

Las determinaciones analíticas se realizaron siguiendo los métodos propuestos en MAPA (1982) y Sparks (1996).

3.3.4.1. Humedad.

La humedad de las muestras de suelo se determinó mediante diferencia entre su peso húmedo y su peso seco. Se pesó 1 g de muestra y se mantuvo en la estufa a 105° durante 24 horas, volviéndose a pesar después, obteniéndose la humedad a partir de la diferencia entre ambos pesos, expresada como porcentaje de suelo seco.

3.3.4.2. Materia orgánica.

La materia orgánica es un parámetro importante de un suelo ya que condiciona la fertilidad de éste, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Así favorece la estructura del suelo, incrementa la capacidad de retención de agua, disminuye la conductividad térmica, aumenta la capacidad de intercambio catiónico y eleva su capacidad amortiguadora de cambios de pH entre otras muchas propiedades. Para la determinación de la materia orgánica en nuestros suelos hemos utilizado el método de calcinación, consistente en diferencia de pesada. Para ello, una vez medida la humedad del suelo, la misma muestra fue introducida en una mufla a 540 °C durante 2 horas, siendo pesada posteriormente en una balanza analítica.

3.3.4.3. Contenido de amonio.

Para la determinación del nitrógeno en estado de amonio se tomaron 10 g de muestra de suelo a los que se les añadió 100 ml de KCl 2M. Las muestras se agitaron durante 1 hora y se agitaron a 35 rev/min durante 30 minutos. Posteriormente se pasaron por filtros Whatman nº 2. Una vez filtradas, la determinación del amonio se hizo mediante una destilación por arrastre de vapor en un sistema de destilación KJELTEC en presencia de MgO, recogiendo el condensado en ácido bórico al 4% y valorando con un ácido de normalidad conocida.

Para la determinación del nitrógeno en estado de nitrato, tras la destilación del amonio se añadieron en el mismo tubo de destilación Kjeldhal 0,2 g de aleación de Devarda. Este compuesto reduce el nitrato presente en el extracto a amonio, pudiendo así determinarse su concentración mediante una nueva destilación.

3.3.4.4. Método de fumigación- extracción.

La fumigación con cloroformo provoca la muerte de las células microbianas del suelo por la rotura de las membranas celulares, con lo que el contenido citoplasmático de las células microbianas es vertido al suelo, de donde puede ser extraído y determinado comparando los resultados obtenidos en suelos fumigados con los de los suelos no fumigados. Con la calibración apropiada se puede relacionar las concentraciones extraídas con el contenido de P y N microbiano del suelo. El método (Brookes *et al.* 1985 y Vance *et al.* 1987) consta de cuatro fases: división de las submuestras, fumigación con cloroformo libre de etanol, extracción y determinación analítica de los extractos y cálculo del N y P microbiano.

1. De cada muestra de suelo, se separaron seis submuestras, la mitad fue sometida al proceso de fumigación y la otra mitad se analizó sin fumigar. Las muestras sin fumigar siguieron directamente los procesos de extracción y determinación que se detallan en los siguientes apartados para los distintos elementos. La otra mitad de las muestras primero sufrieron el proceso de fumigación y después fueron analizadas de la misma forma que las anteriores.
2. Fumigación con cloroformo libre de etanol. Las muestras de suelo húmedo se tamizaron, homogeneizaron y se colocaron dentro de un desecador de vacío, en el cual se había dispuesto papel húmedo en su parte inferior para mantener una atmósfera de humedad. Dentro del desecador se colocó un vaso de precipitado con 25 ml de cloroformo libre de etanol. Se aplicó vacío hasta que el cloroformo hirvió vigorosamente durante dos minutos. La incubación con cloroformo se mantuvo durante 24 horas. Tras la incubación se evacuó el cloroformo de las muestras fumigadas y posteriormente se procedió a la extracción.



Imagen 14.- Desecador de vacío. Proceso de fumigación.

3.3.4.5. Extracción y determinación del fósforo disponible.

El contenido en fósforo disponible se determinó mediante dos métodos:

1. El método Olsen. Es el método oficial de análisis de disponibilidad de fósforo utilizado en la mayoría de los países del área mediterránea. Con este método se extrae el fósforo del suelo o disponible con Bicarbonato sódico (NaHCO_3) 0.5 N como extractante, a un pH aproximadamente de 8.5.
2. El método Bray-Kurtz (1945) extrae el fósforo con $\text{HCl-NH}_4\text{F}$, que disuelve formas de fósforo fácilmente solubles en ácido, especialmente fosfatos cálcicos, y una fracción de los de Fe y Al. Este método está recomendado para suelos ácidos, como es nuestro caso.
3. En ambos casos la extracción se realizó empleando 5gr de suelo y 50 ml de extractante, se agitó durante 15 minutos para el P-Bray y 30 minutos para el P-Olsen y se procedió al filtrado y recolección del extracto.
4. Una vez obtenido el extracto, en cualquiera de los dos métodos, para determinar el P se utilizó la colorimetría con ácido ascórbico según el Método Murphy (Murphy y Rile, 1962) empleando un espectrofotómetro HACH DR 2000.

3.3.4.6. Extracción y determinación del nitrógeno disuelto.

Para la determinación del nitrógeno disuelto se tomaron 10 g de muestra fresca a los que se les añadió 50 ml de K₂SO₄ 1M y se mantuvo en agitación durante 1 hora. El nitrógeno contenido en los extractos se determinó en un analizador de flujo nitrógeno NT-Vesh (Shimadzu).

3.3.4.7. Cálculo del nitrógeno y fósforo microbiano.

El N y P de la biomasa microbiana puede ser estimado por diferencia entre el contenido de N y P en los extractos de suelo no fumigado y los de suelo fumigado. No toda la biomasa presente en el suelo llega a ser extraída, por eso el valor de las determinaciones ha de ser dividido entre el factor de calibración o extractabilidad (K) (Joergensen *et al.* 1995; García *et al.* 2003). La extractabilidad (K) se calcula inoculando una cantidad conocida de biomasa microbiana cuyos ratios C/N y C/P sean también conocidos, así conociendo la extractabilidad del C de la biomasa y los ratios con N y P podemos determinar las constantes de los tres casos.

K ha sido determinada experimentalmente en diferentes condiciones (temperatura y duración de la fumigación, tipos de suelo y método determinación). En nuestro caso tomamos para el nitrógeno, el valor determinado por Jenkinson en 1988 (Kn: 0,45) y para el fósforo el, determinado por Brookes *et al.* en 1982 (Kp: 0,40).

$$\text{Nitrógeno biomasa} = \frac{\text{N disuelto fumigadas} - \text{N disuelto no fumigadas}}{\text{Kn}}$$

$$\text{Fósforo biomasa} = \frac{\text{Fósforo fumigadas} - \text{Fósforo no fumigadas}}{\text{Kp}}$$

3.3.4.8. Análisis de datos.

En este trabajo empleamos una técnica estadística orientada a *comparar grupos de individuos*. Por un lado, comparamos de manera global los datos de todos los microsítios estudiados y seguidamente hacemos la comparación entre los microsítios de una misma parcela. Esto nos permite detectar la existencia de diferencias significativas entre los microsítios estudiados. Existiendo diferencias entre sitios se procedió a una comparación por pares (“post-hoc”) que permitió determinar concretamente las diferencias entre los microsítios.

Por otra parte se realizó un estudio de correlaciones que permitió establecer y cuantificar las relaciones significativas entre las variables estudiadas es este proyecto así como con variables referentes a las condiciones abióticas del medio recogidas en anteriores proyectos (véase Polo, 2006 y Pozuelo, 2007)

3.3.4.8.1. Comparación de grupos.

Puesto que la mayoría de las variables empleadas no cumplían los requerimientos para la aplicación de los llamados tests paramétricos (como por ejemplo la normalidad de la distribución o la homogeneidad de las varianzas de los grupos que se comparan) empleamos uno de los denominados no paramétricos, el test de *Kruskal-Wallis*, que permite concluir acerca de la homogeneidad o heterogeneidad estadística de un conjunto de muestras.

Emplea el estadístico H definido como:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Siendo N el número total de datos, k el número de grupos que se comparan, n_i el tamaño del grupo i y R_i la suma de los rangos de las observaciones que corresponden al grupo i. El rango es el número de orden que corresponde al dato, al ser ordenado el conjunto de menor a mayor.

Comparando con las tablas de referencia del estadístico (lo que en este trabajo se hace automáticamente con los programas que se citan debajo) se obtiene un valor de p

que informa sobre la frecuencia con que el estadístico adopta dicho valor por mero azar en las condiciones (tamaño muestral, etc.) del supuesto estudiado. Si dicha frecuencia es menor que un valor pequeño de referencia (o nivel de significación, normalmente 5% ó 1%) se admite que las diferencias observadas no se deben únicamente al azar. Se dice entonces que dichas diferencias son significativas, rechazándose la hipótesis de que las muestras provienen de la misma población. En caso contrario, se concluye que al menos una de las muestras proviene de una población con mediana diferente a las demás.

En el caso de dos grupos este test coincide con el test U de Mann-Whitney, cuyo estadístico viene definido por:

$$U_i = R_i - \frac{n_i(n_i+1)}{2}$$

Siendo U_i el valor del estadístico U en el grupo i , n_i el tamaño del grupo i y R_i la suma de los rangos de las observaciones que corresponden al grupo i . El rango es el número de orden que corresponde al dato, al ser ordenado el conjunto de menor a mayor. El valor mínimo de los dos obtenidos (U_1 y U_2) se compara con las tablas de referencia del estadístico.

3.3.4.8.2. Variación conjunta de variables (análisis de correlaciones).

Para este análisis empleamos el coeficiente de correlación rho de Spearman (r_s), una medida de relación entre dos variables que utiliza valores medidos a nivel de una escala ordinal. Este viene dado por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

donde $d_i = r_{xi} - r_{yi}$ es la diferencia entre los rangos de X e Y.

El valor de ambos coeficientes oscila entre -1 y +1. Su valor absoluto informa sobre la intensidad de la relación lineal entre las variables y el signo sobre si la relación es directa (+) o inversa (-), de forma que un valor de +1 (-1) indica una relación lineal positiva (negativa) perfecta y uno próximo a cero indica que no existe relación lineal entre las dos variables.

3.3.4.8.3. Repetición de tests.

Cuando, como en el presente trabajo, se llevan a cabo cientos de tests estadísticos para alcanzar las conclusiones finales, hay que tener en cuenta que por el mero hecho de repetir tests puede surgir, por mero azar, valores de p inferiores a 0.05 sin que realmente las poblaciones que se comparan sean distintas.

Para evitar el aumento desmedido de este tipo de errores se tiende a imponer criterios más estrictos cuando se evalúa el resultado de un test conjuntamente con otros, que cuando se evalúa aisladamente. Con tal fin se han propuesto diversos procedimientos los cuales, básicamente, llevan a obtener un valor umbral de p inferior al genéricamente establecido para los tests individuales (normalmente 0.05), de forma que aquellos valores de p que excedan este nuevo umbral no pueden considerarse estadísticamente significativos (aunque sean inferiores a 0.05).

En este trabajo efectuamos una corrección global para todas las tablas de tests de comparación denominada FDR (en inglés ‘False Discovery Rate’, FDR, véase García, 2003, 2004). Tras dicha corrección se espera que no más del 5% de los resultados declarados significativos sean ‘descubrimientos espurios’.

3.3.4.8.4. Software empleado.

Para llevar a cabo los análisis estadísticos anteriormente descritos se han empleado la hoja de cálculo Excel 2003 (Microsoft Corporation, 2002) y el programa Statistica versión 6.0 (Statsoft, 2001).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 VARIABILIDAD DE LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y NITRÓGENO DISPONIBLES Y RETENIDAS EN LA MASA MICROBIANA

4.1.1. FÓSFORO OLSEN.

4.1.1.1. Primavera.

En la *Tabla 3* se presentan los valores medios y de dispersión del contenido de fósforo inorgánico disponible y fósforo microbiano extraído según el método Olsen en los seis microsítios estudiados, en primavera. Se muestra también el valor medio de la proporción de fósforo retenido en la masa microbiana con respecto al total de fósforo potencialmente disponible ($P_{\text{inmovilizado}} = P_{\text{microbiano}} / (P_{\text{microbiano}} + P_{\text{disponible}})$). Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H para varios grupos y Test U para dos grupos) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 3.- Valores medios y de desviación estándar correspondientes a la concentración en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de fósforo inorgánico disponible (P_{dis}), fósforo microbiano (P_{mic}) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (P_{inm}) medidos en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

P OLSEN			PANERA										TIRADERO						GLOBAL	
			<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H	
			X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p
PRIMAVERA	0-8 cm	Pmic	16,64	6,01	15,50	7,17	10,94	4,14	6,33	2,30	18,14	0,001	6,74	3,10	6,20	4,22	41,0	0,496	28,84	0,000
		Pdisp	2,05	0,51	1,79	0,74	1,75	0,48	1,77	0,68	3,79	0,285	1,43	0,38	1,28	0,42	36,0	0,290	14,77	0,011
		Pinm	88,56	2,21	88,10	6,96	85,30	4,33	76,66	9,49	16,57	0,001	80,04	9,01	74,59	21,51	50,00	1,000	16,47	0,006
	8-16 cm	Pmic	6,88	2,94	3,72	2,01	4,16	3,90	3,29	2,25	8,29	0,040	7,59	3,75	4,53	2,30	23,0	0,041	13,75	0,017
		Pdisp	1,71	0,50	1,41	0,52	1,11	0,32	1,86	0,79	8,34	0,040	0,46	0,28	0,43	0,32	47,0	0,821	40,70	0,000
		Pinm	76,60	7,98	69,08	13,91	67,11	28,71	56,43	23,87	7,06	0,070	92,72	6,70	85,24	13,25	35,0	0,257	26,26	0,000

Como se puede apreciar en la *Tabla 3*, los valores medios de fósforo microbiano obtenidos en nuestro estudio varían entre 3.3 mg.kg^{-1} y 16.6 mg.kg^{-1} , siendo en general los valores de la capa superficial (hasta 8 cm de profundidad) mayores a los de la capa subsuperficial (entre 8 y 16 cm de profundidad). El rango de variación es mucho mayor en la capa superficial, donde se observaron medias mínimas de 6.3 mg.kg^{-1} y máximas de 16.6 , que en la subsuperficial donde las medias variaron de 3.3 mg.kg^{-1} a 7.6 mg.kg^{-1} . Los valores obtenidos para P microbiano fueron inferiores a los encontrados en otros sistemas forestales tropicales (Raghubanshi, 1991) donde el rango variaba de 17 a 40 mg.kg^{-1} , y sistemas forestales mediterráneos donde se determinaron 42 mg.kg^{-1} de P microbiano (Scheider *et al.* 2001). En ambos casos la determinación se realizó empleando el método Olsen.

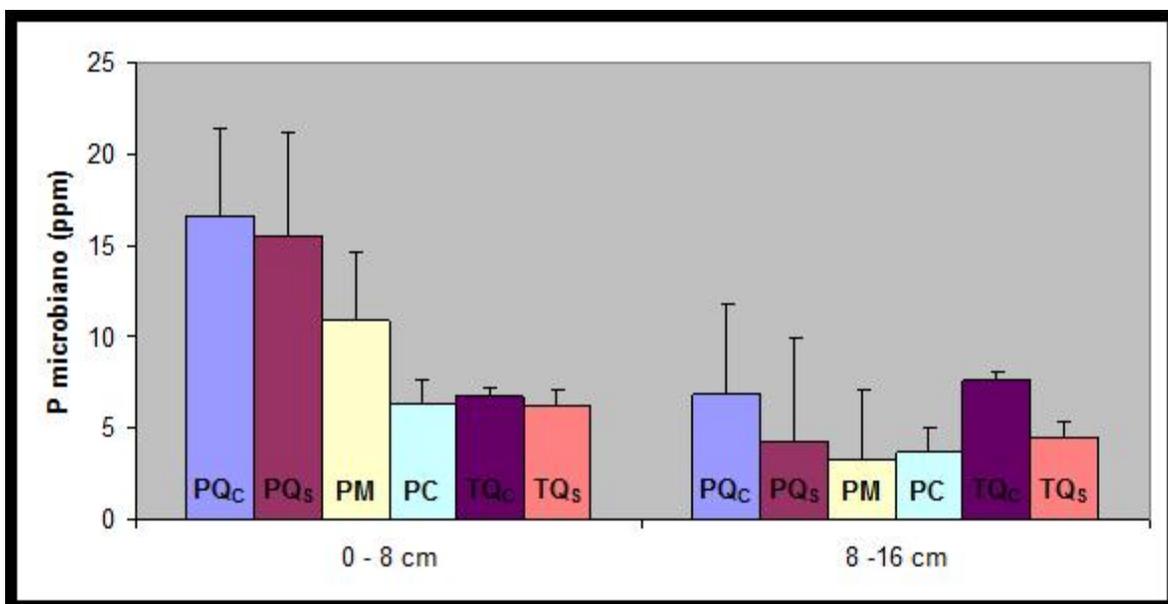


Gráfico 1.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Olsen, medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQ_c (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQ_s (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQ_c (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQ_s (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

En la parcela de *Panera*, en la capa superficial, los valores de fósforo microbiano crecieron secuencialmente en los suelos extraídos en claros, bajo matorral, bajo *Q. suber* y bajo *Q. canariensis*, siendo significativa la diferencia entre los sitios de valores mínimos (zonas de claro) y de máximos (bajo *Q. canariensis*). La diferencia existente entre las zonas con vegetación y la zona de claros puede deberse a la influencia que las plantas tienen en la masa microbiana a través de las secreciones de carbohidratos de las raíces. De este modo la presencia de vegetación estimula el

crecimiento microbiano. En *Tiradero* los suelos bajo las dos especies de *Quercus* mostraron valores semejantes, con una media de aproximadamente 6.5 mg.kg^{-1} de fósforo microbiano.

Los suelos bajo cobertura arbórea de *Panera*, donde se estimaron valores de más de 15 mg.kg^{-1} de fósforo microbiano, tenían un contenido significativamente mayor de fósforo inmovilizado en la masa microbiana que los suelos estudiados en *Tiradero*, donde los valores no superaron los 7 mg.kg^{-1} . Los patrones de variabilidad de la capa subsuperficial difieren de los observados en la capa superficial donde existía una clara diferencia entre parcelas, independientemente del tipo de cobertura vegetal. En este caso, los valores máximos de fósforo microbiano se encontraron en los suelos bajo *Q. canariensis* tanto en *Tiradero* (7.6 mg.kg^{-1}) como en *Panera* (6.9 mg.kg^{-1}), difiriendo de un modo significativo (o marginalmente significativo) de los encontrados bajo *Q. suber*. Esta diferencia entre especies no observada en la capa superficial hace suponer que las condiciones del suelo subsuperficial varían entre las dos especies arbóreas, siendo el subsuelo de *Q. canariensis* más favorable para el desarrollo de masa microbiana que el de *Q. suber*, el cual se muestra valores tan bajos como los encontrados en la zona de claro.

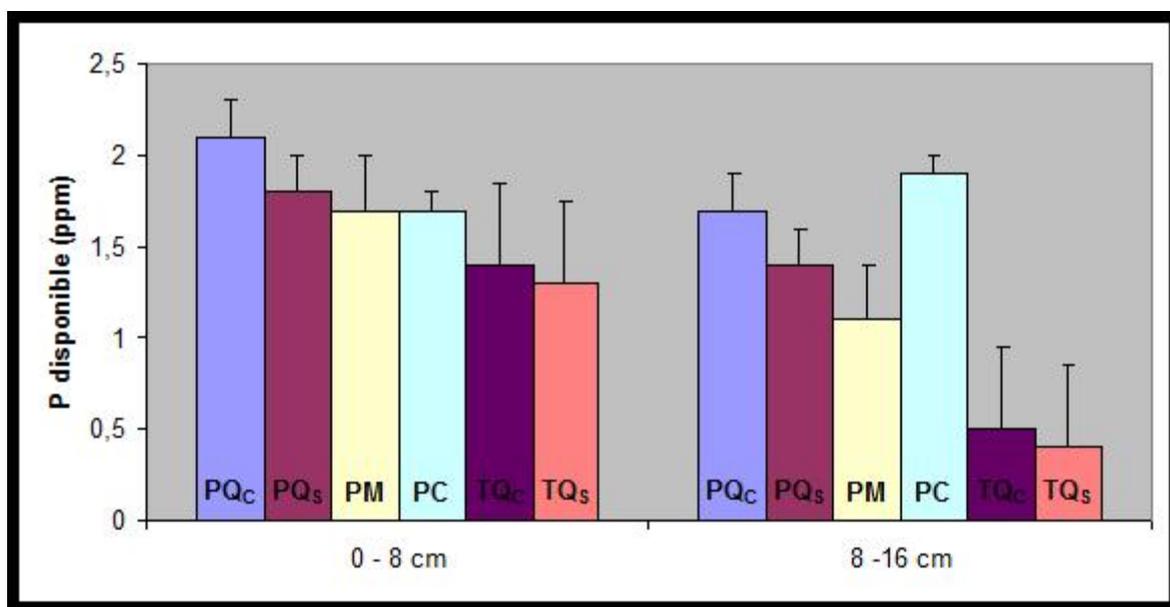


Gráfico 2.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Olsen en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQ_c (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQ_s (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQ_c (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQ_s (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Con respecto al fósforo disponible extraído por el método Olsen, todos los suelos estudiados podrían clasificarse como pobres, encontrándose los valores obtenidos muy por debajo de los valores de referencia (normalmente establecidos para suelos agrícolas, Junta de Extremadura 1992), que establece 6 mg.kg^{-1} como límite entre normalidad y pobreza. En nuestro estudio, el valor medio máximo por micrositio alcanzó 2.1 mg.kg^{-1} , siendo el mínimo de 0.4 mg.kg^{-1} . La variabilidad a nivel global fue significativa, alcanzándose en los valores máximos en *Panera* y los mínimos en *Tiradero*. Este efecto parcela se observó para cualquiera de los micrositios estudiados.

En *Panera*, no se encontraron diferencias en el fósforo disponible entre las capas superficiales bajo distinta cobertura vegetal. En cambio, en la capa inferior, en los suelos bajo *Q. canariensis* y en zonas de claro se mostró el mayor contenido en fósforo disponible, seguidos de los suelos bajo *Q. suber* y finalmente los suelos bajos cobertura de matorral, cuyos valores fueros significativamente menores a los de *Q. canariensis* y claro. La heterogeneidad de *Panera* no se observó en *Tiradero*, donde las concentraciones de fósforo fueron similares para las dos especies y las dos profundidades.

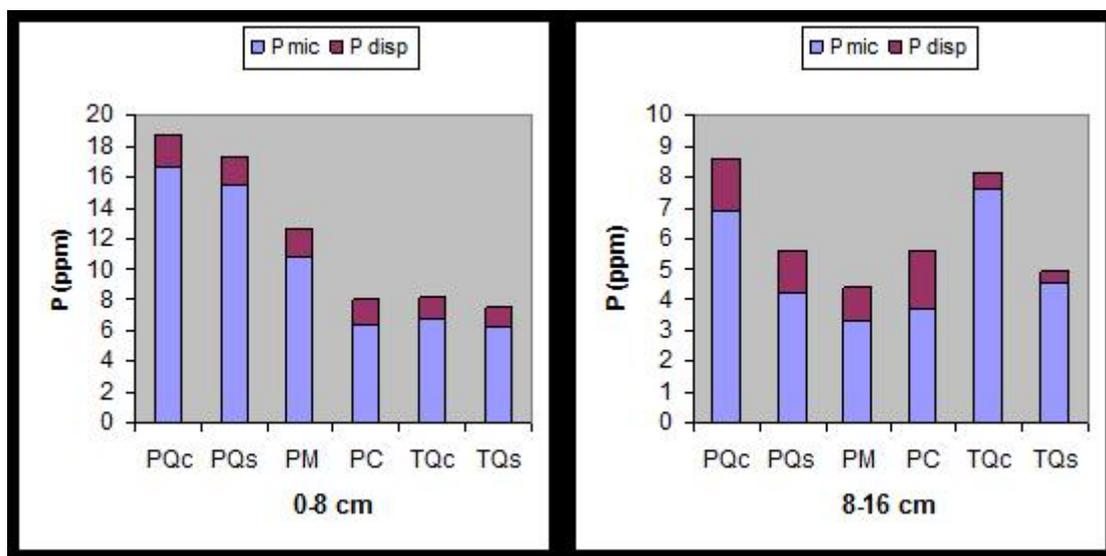


Gráfico 3.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis micrositios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes micrositios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

La proporción de P inmovilizado con respecto al total de P potencialmente disponible fue en todos los casos muy elevada, siendo el promedio general de 78.5%. No se observaron diferencias entre parcelas, aunque sí entre micrositios. En la capa

superficial, en *Panera*, la proporción de P inmovilizado fue menor en los claros (77%) y mayor bajo las especies arbóreas (88%). En la capa subsuperficial los valores bajo *Q. canariensis* (92%) en *Tiradero* fueron superiores a cualquiera de los microsítios en *Panera*, reflejo de la mayor cantidad de fósforo microbiano en estos ambientes. El patrón de variabilidad entre tipos de suelos con distinta cobertura se mantuvo, con valores que decrecen en orden, zonas bajo *Q. canariensis*, zonas bajo *Q. suber*, zonas de matorral y zonas de claro, existiendo diferencias significativas sólo entre los extremos.

En general se observa que los suelos en *Tiradero* son más homogéneos, sin apenas diferencias significativas entre los suelos bajo las dos especies arbóreas. En cambio, la heterogeneidad de la cubierta vegetal existente en *Panera* se relaciona con una mayor variabilidad entre las condiciones del suelo y su contenido en fósforo disponible y microbiano. Mientras que las condiciones bajo las dos especies arbóreas son similares, los suelos en zonas de claro, sin cobertura, presentan valores diferentes para las variables estudiadas. Los claros se muestran como zonas con una menor cantidad absoluta de P inmovilizado, aunque apenas difieren en la concentración de P disponible lo que conlleva un menor porcentaje de P retenido en la masa microbiana. Las condiciones de estas zonas de claro, mayor exposición, mayores oscilaciones térmicas, evapotranspiración y sequedad, así como la menor cantidad de materia orgánica parecen afectar de un modo negativo a la masa microbiana, limitando su crecimiento y contenido en fósforo.

4.1.1.2. Verano.

En la *Tabla 4* se presentan los valores medios y de dispersión del contenido en fósforo inorgánico disponible y el fósforo microbiano extraído según el método Olsen y expresado en partes por millón (mg.kg^{-1}) en los seis microsítios estudiados, en verano. Se muestra también el valor medio de la proporción de fósforo retenido en la masa microbiana con respecto al total de fósforo potencialmente disponible. Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H y Test U) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 4. Valores medios en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis micrositios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

P OLSEN			PANERA										TIRADERO						GLOBAL	
			<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H	
			X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p
VERANO	0-8 cm	Pmic	10,07	6,64	9,18	8,05	6,23	5,10	4,62	1,75	5,32	0,150	4,17	1,19	3,41	2,25	32,0	0,174	12,55	0,279
		Pdisp	1,80	0,72	1,58	0,58	1,46	0,73	1,18	0,34	4,76	0,190	1,92	0,60	2,37	1,08	38,0	0,364	13,85	0,166
		Pinm	82,62	7,45	77,32	14,43	70,87	22,31	77,87	8,45	2,19	0,534	67,57	11,59	53,78	24,84	34,0	0,227	15,84	0,007
	8-16 cm	Pmic	2,64	2,47	3,29	2,92	2,73	2,63	2,01	1,32	0,24	0,971	1,12	1,03	1,52	1,43	41,50	0,515	5,21	0,391
		Pdisp	0,67	0,24	0,70	0,42	0,66	0,29	0,71	0,27	0,24	0,971	1,68	0,55	1,77	0,64	45,0	0,706	33,22	0,000
		Pinm	69,36	24,11	63,91	35,45	70,29	20,19	70,03	11,47	0,38	0,944	35,39	29,20	39,53	30,27	45,5	0,730	16,21	0,006

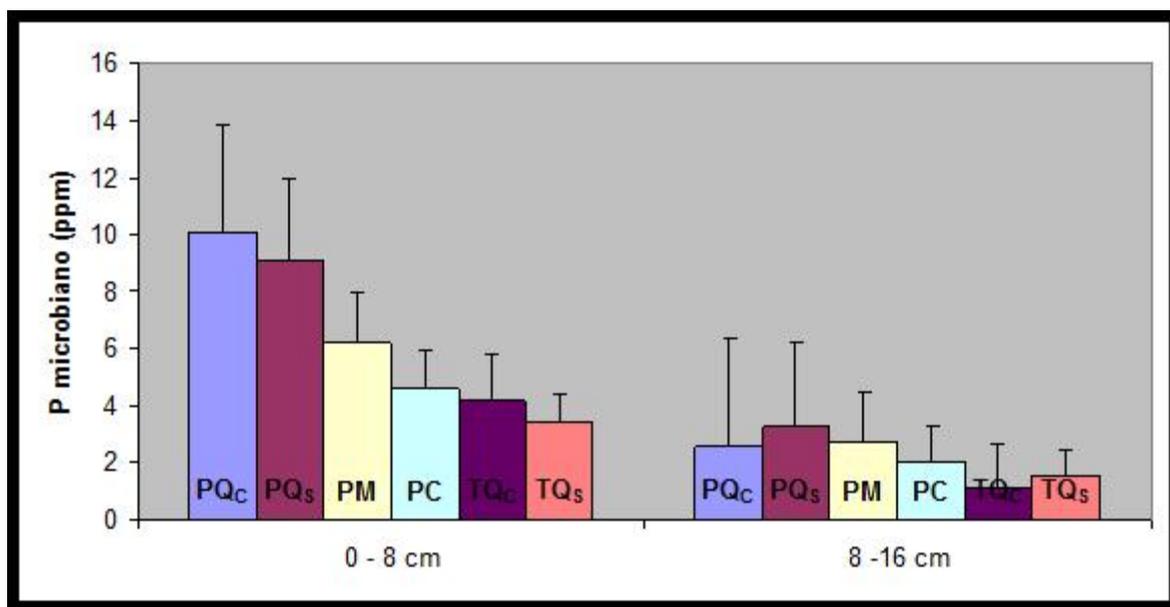


Gráfico 4.- Valores medios en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Olsen medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis micrositios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes micrositios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en Panera), PQs (bajo *Q. suber* en Panera), PM (zona de matorral en Panera), PC (zona de claro en Panera), TQc (bajo *Q. canariensis* en Tiradero) y TQs (bajo *Q. suber* en Tiradero).

En verano, el rango de variación del P microbiano encontrado en la capa superficial (10,1-3,4 mg.kg⁻¹) es muy superior a la variación en la capa en profundidad donde, las concentraciones fueron mucho más homogéneas (3,3-1,1 mg.kg⁻¹). Los micrositios de *Panera* siguen el mismo patrón de aumento de concentración que en primavera: zonas de claro, zonas de matorral, zonas bajo *Q. suber* y zonas bajo *Q. canariensis*, siendo significativa la diferencia entre los micrositios extremos. De los elevados valores de P microbiano encontrados bajo *Q. suber* y *Q. canariensis* se puede deducir que bajo las especies arbóreas se dan condiciones similares que de algún modo favorecen la proliferación de los microorganismos. En la capa en profundidad el contenido es parecido en todos los micrositios de la parcela, no existiendo diferencias significativas entre ellos. En *Tiradero* no se observaron diferencias entre las dos especies arbóreas, presentando contenidos estadísticamente inferiores a los contenidos bajo cubierta arbórea en *Panera*. Para la capa en profundidad no se encontraron diferencias significativas en ninguno de los casos hallándose el valor máximo en *Panera* bajo *Q. suber* (3,3 mg.kg⁻¹) y el mínimo en *Tiradero*, bajo *Q. canariensis* (1,1 mg.kg⁻¹).

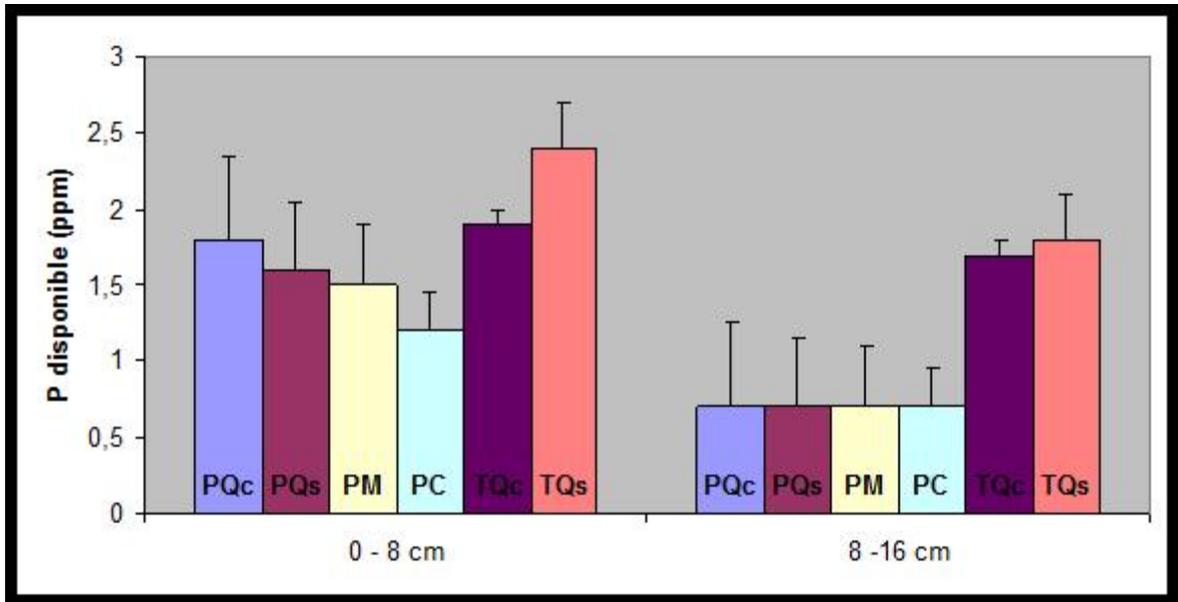


Gráfico 5.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Olsen en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis micrositios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes micrositios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Los suelos de *Tiradero*, en concreto los estudiados bajo *Q. suber* mostraron las concentraciones máximas de P disponible en la estación estival (2,4 mg.kg⁻¹ para la capa superior y 1,8 mg.kg⁻¹ para el inferior). En general los suelos superficiales de *Tiradero* mostraron un mayor contenido en P inorgánico disponible que los suelos estudiados en *Panera*, siendo significativa la diferencia con las zonas de claro, con concentraciones de 1,2 mg.kg⁻¹. Con respecto a la capa subsuperficial, los suelos de *Panera* presentaron valores muy homogéneos y estadísticamente inferiores a los encontrados en *Tiradero*.

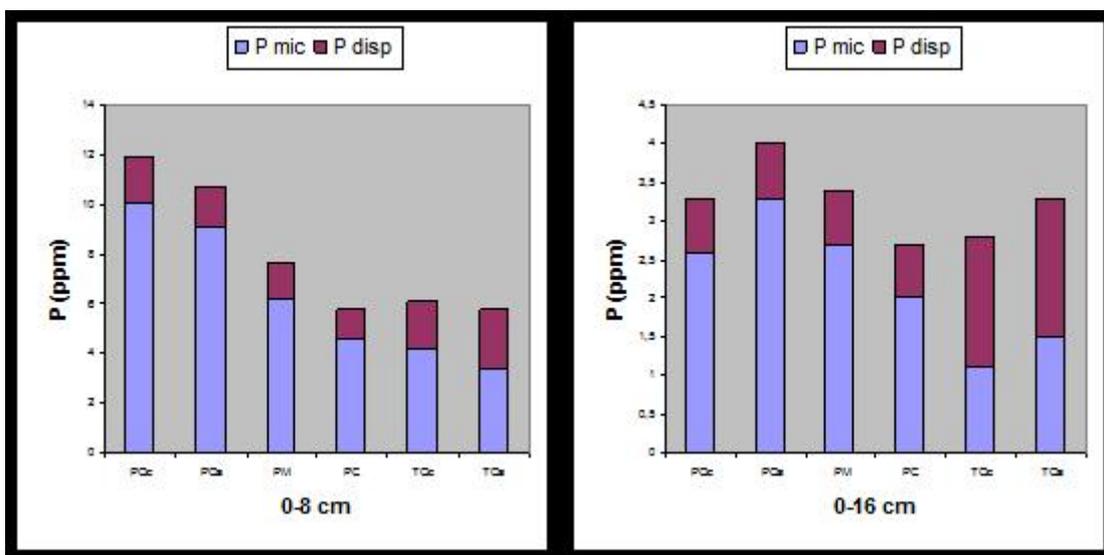


Gráfico 6.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

La proporción de P retenida es estadísticamente mayor en *Panera* (72,8% de valor medio) que en *Tiradero* (49,1%). En *Panera* en valor medio máximo se alcanzó en las zonas bajo *Q. canariensis* (82,6%) y el mínimo en las zonas de matorral (70,9%), para la capa superficial. En la capa inferior sin embargo, el máximo se dio en las zonas de matorral, con un 70,3% y el mínimo en las zonas bajo *Q. suber* con 63,9%. En *Tiradero* los valores son algo menores comparados con los hallados en *Panera* en el nivel superficial, dándose el mínimo para las zonas bajo *Q. suber* (53,8%) y muy inferiores cuando se compara lo valores de fósforo inmovilizado en profundidad.

Con respecto a la variación estacional de las distintas fracciones de fósforo se observa una notable reducción en las concentraciones de fósforo microbiano asociada al periodo estival. En cambio los valores de fósforo disponible en el suelo se mantuvieron similares en ambas estaciones.

4.1.2. FÓSFORO BRAY.

4.1.2.1. Primavera.

En la *Tabla 5* se presentan los valores medios y de dispersión del contenido en fósforo inorgánico disponible y el fósforo microbiano extraído según el método Bray y expresado en miligramos por kilogramo de suelo en los seis microsítios estudiados, en primavera. Se muestra también el valor medio de la proporción de fósforo retenido en la masa microbiana con respecto al total de fósforo potencialmente disponible. Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 5.- Valores medios en mg kg^{-1} y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

P BRAY		PANERA										TIRADERO						GLOBAL		
		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H		
		X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p	
PRIMAVERA	0-8 cm	Pmic	28.31	4.07	28.94	7,87	23.01	9.67	12.23	8.19	15.00	0.002	12.23	6.96	10.44	3.12	36.0	0.290	33.30	0.000
		Pdisp	2.16	1.83	2.36	1.91	1.36	1.01	1.96	1.27	2.01	0.571	2.72	0.80	2.16	0.95	31.0	0.151	9.38	0.095
		Pinm	92.63	6.90	91.12	8.58	93.12	5.55	82.02	12.62	5.23	0.156	74.89	21.23	82.23	7.79	48.0	0.880	17.85	0.003
	8-16 cm	Pmic	14.59	5.24	10.96	4.43	11.32	4.90	5.43	2.86	16.47	0.001	4.54	4.55	2.87	2.68	38.0	0.363	32.08	0.000
		Pdisp	1.17	0.66	1.52	0.98	0.56	0.45	1.36	0.75	9.62	0.002	1.86	0.88	0.83	0.69	15.0	0.008	16.65	0.005
		Pinm	91.46	6.19	86.88	9.24	86.06	30.45	71.67	28.31	9.87	0.020	55.25	37.82	64.62	36.90	43.0	0.595	18.90	0.002

Los valores de las distintas fracciones de fósforo medidas en el suelo según el método Bray (Bray y Kurtz 1945) fueron en general superiores a los determinados con el método Olsen, aunque se mantienen los patrones de variabilidad espacial encontrados. Las determinaciones siguiendo el método Bray alcanzaron valores de hasta 29 mg.kg⁻¹ de fósforo microbiano, correspondientes a 91% del total de fósforo potencialmente disponible.

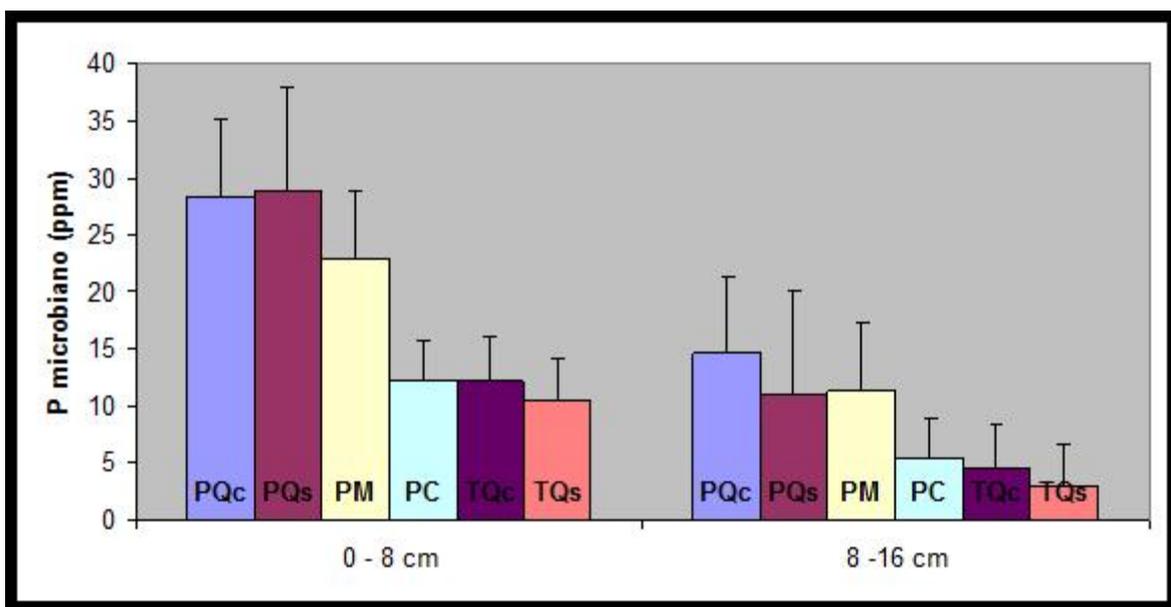


Gráfico 7.- Valores medios en mg.kg⁻¹ y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Bray medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

El rango de variación obtenido para el P microbiano fue mucho mayor en la capa superficial (10,4-28,3 mg.kg⁻¹) que en profundidad (2,9-14,6 mg.kg⁻¹). En ambos casos el mínimo se obtuvo en la zona bajo *Q. suber* en *Tiradero*. En la capa superficial, 0-8 cm, se observó que en *Panera*, las concentraciones de P microbiano incrementaban en el orden siguiente: zonas de claro, zonas de matorral, zonas bajo *Q. canariensis* y zonas bajo *Q. suber*, siendo significativas las diferencias entre las zonas de claros y los otros tres microsítios. En *Tiradero* en cambio no se observaron diferencias entre las dos especies arbóreas, teniendo una media aproximada de 11,3 mg.kg⁻¹.

Los contenidos en P microbiano en los microsítios de árboles y matorral en *Panera* (con un valor medio de 26,7 mg.kg⁻¹) fueron estadísticamente superiores a los de *Tiradero* (valor medio de 11,3 mg.kg⁻¹), cuyo valor se asemeja al encontrado en las

zonas de claro. En la capa en profundidad, 8-16 cm, el valor máximo se observó bajo *Q. canariensis* en *Panera* (14,6 mg.kg⁻¹), siendo muy superior al contenido máximo en *Tiradero*, también para el micrositio bajo *Q. canariensis* (4,5 mg.kg⁻¹).

Ambas profundidades, superficial y subsuperficial, presentaron el mismo patrón de variabilidad espacial, existiendo diferencias significativas entre los micrositios con una mayor contenido en P microbiano (*Q. canariensis*, *Q. suber* y matorral en *Panera*) y aquellos con inferior contenido en esta fracción (zonas de claro en *Panera* y bajo *Q. canariensis*, *Q. suber* en *Tiradero*).

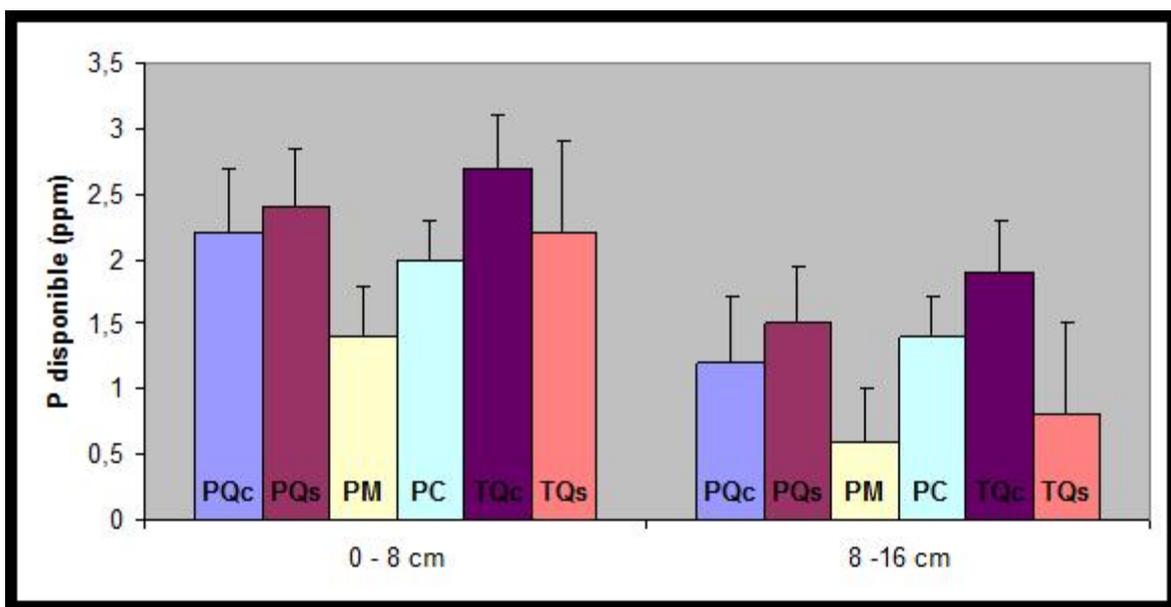


Gráfico 8.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Bray en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis micrositios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes micrositios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Al igual que ocurría con el método Olsen, los valores del P disponible extraídos con el método Bray se encuentran muy por debajo de los valores de referencia. El valor máximo fue de 2,7 mg.kg⁻¹ para el micrositio de *Tiradero* bajo *Q. canariensis* en la capa superficial, y el valor mínimo fue de 0,6 mg.kg⁻¹, en *Panera*, micrositio bajo matorral en la capa en profundidad. Dentro de cada parcela no se apreciaron diferencias entre micrositios siendo sólo estadísticamente diferentes los valores mínimos, hallados bajo matorral, y los máximos determinados bajo *Q. canariensis* en *Tiradero* para ambas profundidades.

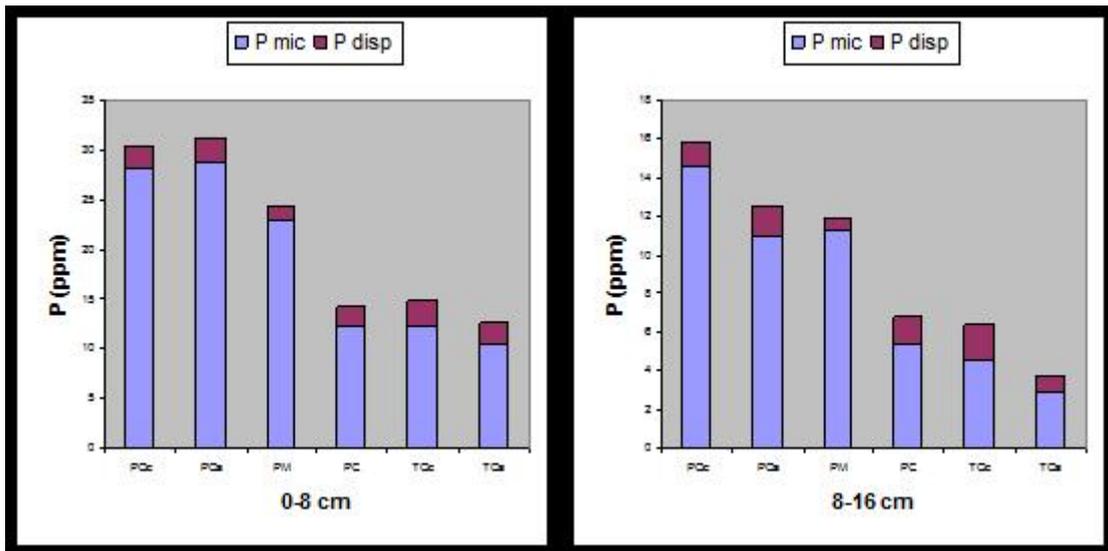


Gráfico 9.- Proporción de fósforo inmovilizado con respecto al total de fósforo potencialmente disponible retenido en la masa microbiana medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

La proporción de P inmovilizado con respecto al total de P potencialmente disponible fue en todos los casos superior al 55%, siendo mayor en *Panera* (86,9% de valor medio), donde ambas profundidades se comportan de forma muy parecida, e inferior en *Tiradero*, donde la proporción en P retenido en la masa microbiana en la capa superficial fue del 78% y en el inferior del 60%. En general en porcentaje de P inmovilizado en *Tiradero* fue estadísticamente inferior al inmovilizado en *Panera*.

La falta de diferencias significativas encontradas en *Tiradero*, entre los suelos bajo ambas especies arbóreas indica una alta homogeneidad en sus condiciones abióticas. *Panera* en cambio mostró una mayor heterogeneidad en la masa microbiana puesto que las zonas de claro presentaron una menor concentración de P microbiano que el resto de los microsítios (zona de matorral, zona bajo *Q. suber* y zona bajo *Q. canariensis*, de menor a mayor concentración). Sin embargo estas diferencias no se encontraron para el P disponible, cuya concentración fue muy similar en toda la parcela ($\approx 1,7 \text{ mg.kg}^{-1}$). Estos resultados son comparables a los obtenidos siguiendo el método Olsen.

4.1.2.2. Verano.

En la *Tabla 6* se presentan los valores medios y de dispersión del contenido en fósforo inorgánico disponible y el fósforo microbiano (mg.kg^{-1}) extraído según el método Bray en los seis microsítios estudiados, en verano. Se muestra también el valor medio de la proporción de fósforo retenido en la masa microbiana con respecto al total de fósforo potencialmente disponible. Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H y Test U) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 6.- Valores medios en mg.kg^{-1} y de desviación estándar correspondientes al fósforo inorgánico disponible (Pdis), fósforo microbiano (Pmic) y proporción de fósforo potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Pinm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

P BRAY			PANERA										TIRADERO						GLOBAL	
			<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H	
			X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p
VERANO	0-8 cm	Pmic	14,02	8,11	16,30	11,85	7,63	5,77	9,67	4,14	5,14	0,162	12,59	4,29	12,06	5,59	43,0	0,880	7,61	0,179
		Pdisp	1,01	0,58	1,16	0,76	0,63	0,57	0,52	0,42	5,76	0,124	1,81	1,10	0,85	0,47	21,0	0,028	14,73	0,011
		Pinm	92,36	4,17	88,80	11,74	90,69	6,35	94,69	4,14	2,80	0,423	86,26	8,38	90,78	8,94	32,0	0,174	5,86	0,320
	8-16 cm	Pmic	4,19	2,57	4,43	2,76	3,16	1,51	3,41	1,76	1,71	0,635	4,00	3,82	3,58	3,73	42,0	0,545	1,77	0,880
		Pdisp	0,28	0,27	0,34	0,33	0,23	0,34	0,19	0,26	1,66	0,647	0,85	0,89	0,45	0,42	39,0	0,402	6,88	0,229
		Pinm	83,19	29,71	93,47	6,07	93,50	9,70	94,79	6,48	2,62	0,453	71,37	31,05	59,38	42,23	38,5	0,382	8,54	0,129

Al igual que ocurría en primavera, el rango de variación en superficie, 0-8 cm, es mayor ($16,3-7,6 \text{ mg.kg}^{-1}$) que en profundidad, 8-16 cm, ($4,4-3,2 \text{ mg.kg}^{-1}$). Para ambas profundidades los valores máximos se hallaron en las zonas bajo *Q. suber* de *Panera* y los valores mínimos en la zona de matorral, también de *Panera*. En ninguna de las parcelas se encontraron diferencias significativas entre sus microsítios, siendo los valores medios de $12,06 \text{ mg.kg}^{-1}$ en *Panera* y $3,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ en *Tiradero*. Esta falta de significación estadística se debió probablemente a la alta variabilidad encontrada entre las réplicas de un mismo microsítio, lo que junto con el limitado número de réplicas redujo de un modo notable la potencia estadística.

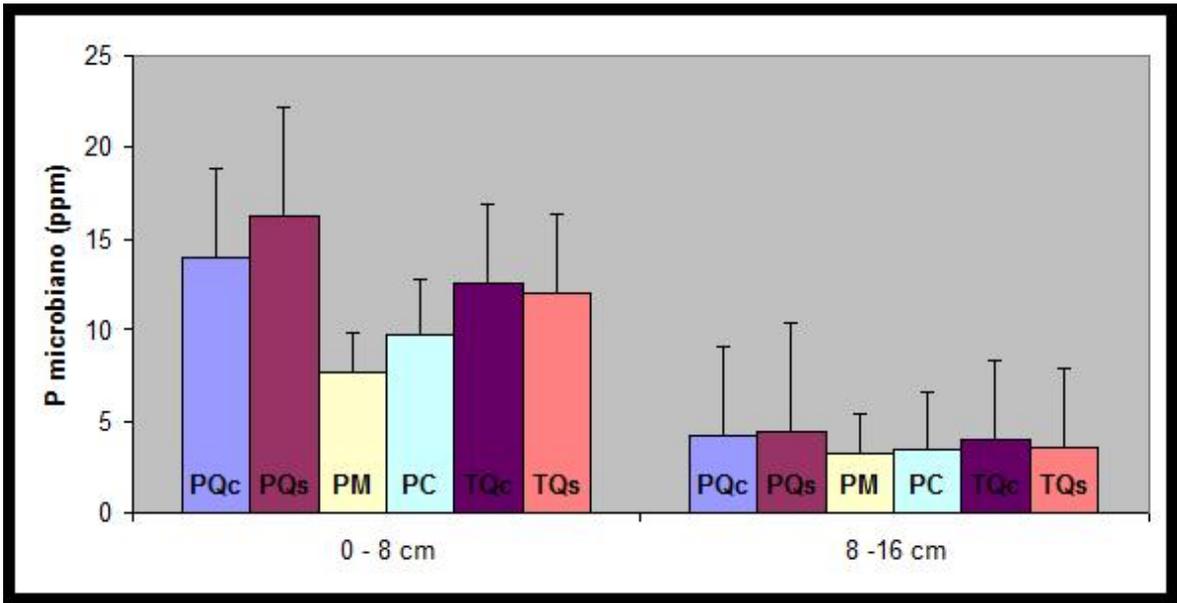


Gráfico 10.- Valores medios en mg.kg^{-1} y error típico correspondientes al fósforo microbiano determinado según el método Bray medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Al margen de la significación estadística, en *Panera*, para las dos profundidades, el contenido de P microbiano creció en los distintos microsítios siguiendo el siguiente orden, zonas de matorral, zonas de claro, zonas bajo *Q. canariensis* y por último zonas bajo *Q. suber*. No se detectaron diferencias dentro de *Tiradero*, ni tampoco al comparar las parcelas entre si.

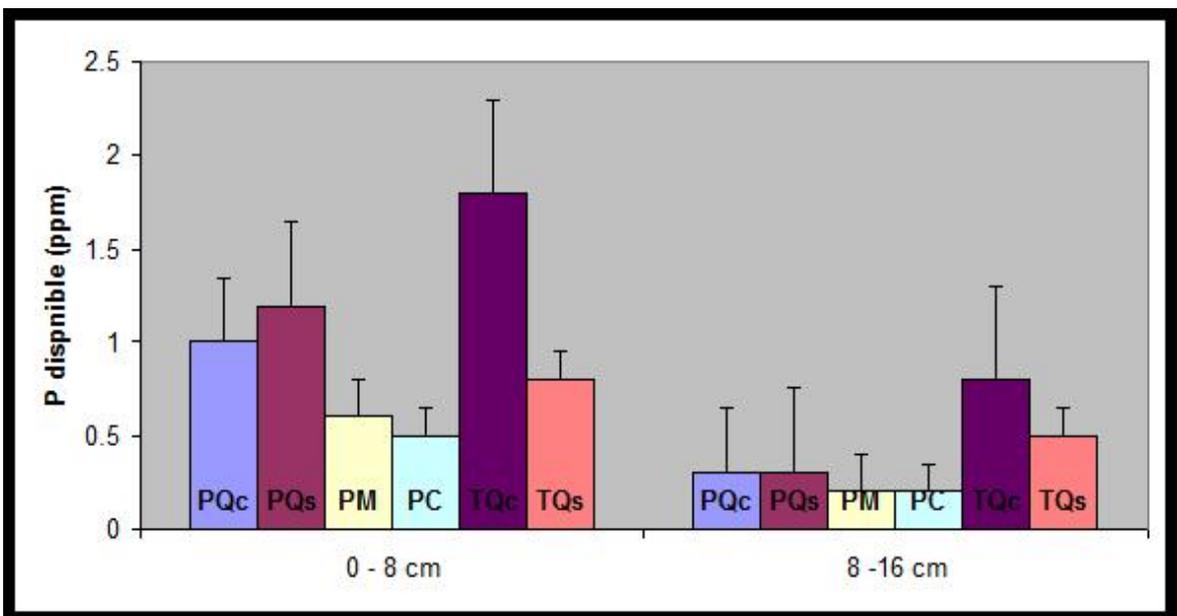


Gráfico 11.- Valores medios y error típico correspondientes al fósforo disponible extraído según el método Bray en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Con respecto al P disponible, no se encontraron diferencias significativas al comparar los distintos microsítios para ninguna de las dos profundidades dentro de cada parcela. El valor máximo se alcanzó en *Tiradero* bajo *Q. canariensis* ($1,8 \text{ mg.kg}^{-1}$) y el mínimo en *Panera* ($0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$), para la capa superficial. En la capa en profundidad los valores máximos y mínimos correspondieron a los mismos microsítios con valores de $0,8$ y $0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ respectivamente. Cabe destacar la elevada concentración de fósforo libre encontrada en los suelos superficiales bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*, estadísticamente superior a la determinada en los suelos más pobres: bajo matorral y claro.

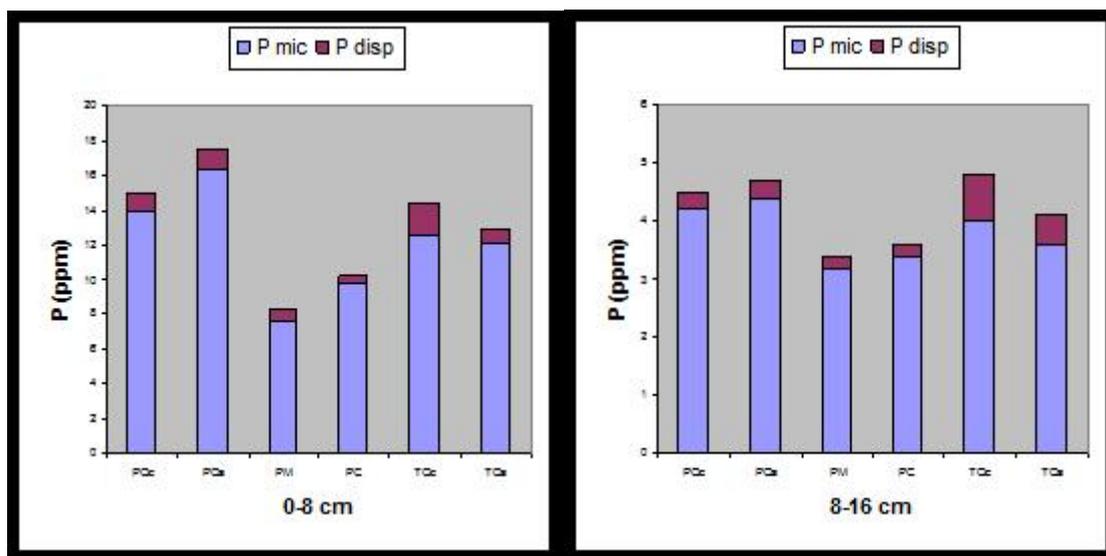


Gráfico 12.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Exceptuando el micrositio bajo *Q. suber* en *Tiradero*, en todos los demás, la proporción de P inmovilizado respecto del total disponible fue superior al 70%. No existieron diferencias significativas entre microsítios dentro de una misma parcela ni tampoco al comparar las parcelas entre si.

De forma general, en la estación estival, no existieron grandes diferencias ni entre parcelas ni dentro de éstas, a excepción de la elevada disponibilidad de P en los suelos bajo *Q. canariensis* de *Tiradero*. Al igual que se observó anteriormente, los valores de P microbiano fueron superiores en primavera que en verano.

4.1.3. NITRÓGENO.

4.1.3.1. Primavera.

En la *Tabla 7* se presentan los valores medios y de dispersión del contenido en nitrógeno microbiano y amonio (mg.kg^{-1}) extraído por destilación en los seis microsítios estudiados, en primavera. Se muestra también el valor medio de la proporción de nitrógeno retenido en la masa microbiana con respecto al total de nitrógeno potencialmente disponible ($\%N_{\text{inm}} = [N_{\text{mic}} / (N_{\text{mic}} + \text{NH}_4^+) * 100$). Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H Y Test U) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 7.- Valores medios (mg.kg^{-1}) y de desviación estándar correspondientes al nitrógeno microbiano (N_{mic}), al amonio (NH_4^+) y proporción de nitrógeno potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (N_{inm}) medidos en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

NITRÓGENO			PANERA								TIRADERO						GLOBAL			
			<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H	
			X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p
PRIMAVERA	0-8 cm	Nmic	37,41	13,65	42,12	14,68	38,04	14,22	41,93	15,47	18,35	0,001	42,36	15,91	42,65	15,66	49,0	0,940	31,90	0,000
		NH ₄ ⁺	5,97	6,46	6,46	6,75	6,26	6,81	6,24	4,55	6,45	0,091	7,16	6,90	7,33	6,81	27,0	0,082	26,30	0,000
		Ninm	86,10	6,88	79,20	18,71	86,62	6,85	84,00	14,93	1,02	0,80	90,08	2,41	91,78	2,37	30,00	0,13	6,91	0,22
	8-16 cm	Nmic	21,55	10,34	23,05	10,53	21,74	8,91	23,03	11,00	6,07	0,108	23,70	10,93	24,35	10,37	39,0	0,406	14,29	0,014
		NH ₄ ⁺	8,90	30,10	9,50	30,07	4,79	2,69	9,50	30,05	9,18	0,027	10,00	29,96	10,04	29,95	40,0	0,450	39,65	0,000
		Ninm	77,87	8,11	76,50	10,42	71,62	26,05	81,33	5,44	2,14	0,54	87,17	7,28	84,16	9,01	42,0	0,545	10,2	0,069

El rango de variación del N microbiano determinado en la capa superficial fue prácticamente el doble que en la inferior. En superficie, la variación entre los microsítios con más y menos concentración alcanzó los 5,24 mg.kg⁻¹, mientras que en profundidad la diferencia es tan sólo de 2,8 mg.kg⁻¹. Para las dos profundidades los valores máximos se encontraron en *Tiradero* en zonas bajo *Q. suber*, 42,65 mg.kg⁻¹ en la capa superficial y 24,45 mg.kg⁻¹ en la capa en profundidad. Los valores mínimos correspondieron a zonas bajo *Q. canariensis* en *Panera*, 37,41 mg.kg⁻¹ en superficie y 21,55 mg.kg⁻¹ en profundidad. Estos valores están en el límite inferior de los encontrados en bosques tropicales (38-70 mg.kg⁻¹) pero por encima de los encontrados en un bosque de coníferas mediterráneo (27 mg.kg⁻¹) (Raghubanshi, 1991; Dumonet *et al.*, 1996).

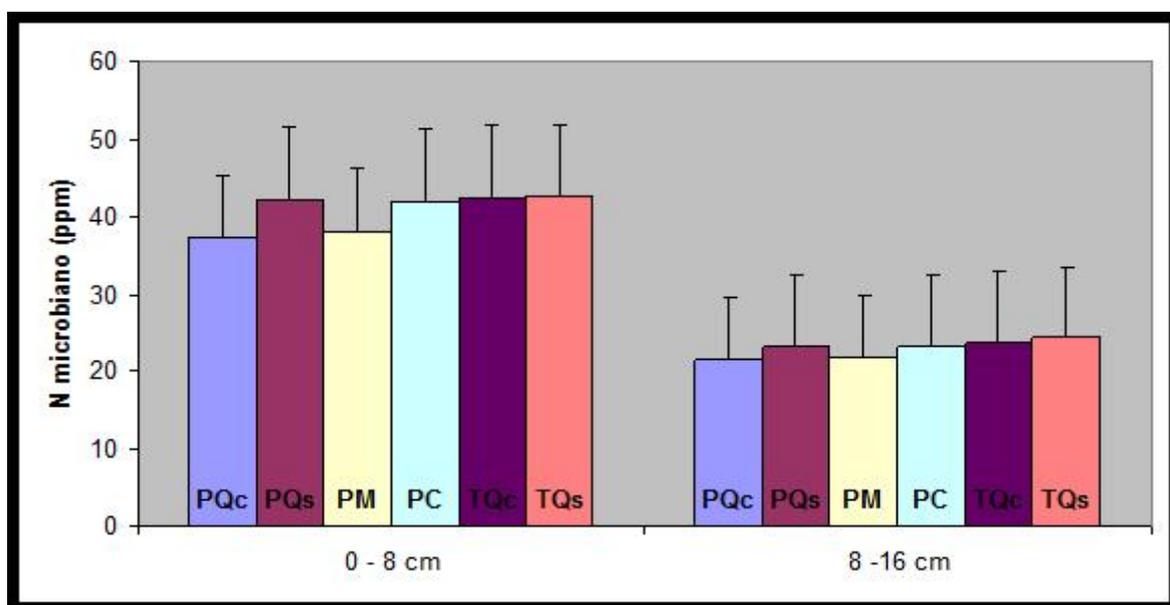


Gráfico 13.- Valores medios (mg.kg⁻¹) y error típico correspondientes al nitrógeno microbiano medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

En la capa superior se apreciaron diferencias significativas entre zonas bajo *Q. canariensis* y zonas de matorral en *Panera* (microsítios con la menor concentración) con el resto de zonas tanto de *Panera* como de *Tiradero*, las cuales presentaron unas concentraciones muy parecidas. En *Tiradero* no se apreciaron diferencias entre sus microsítios siendo los contenidos de ambos muy similares.

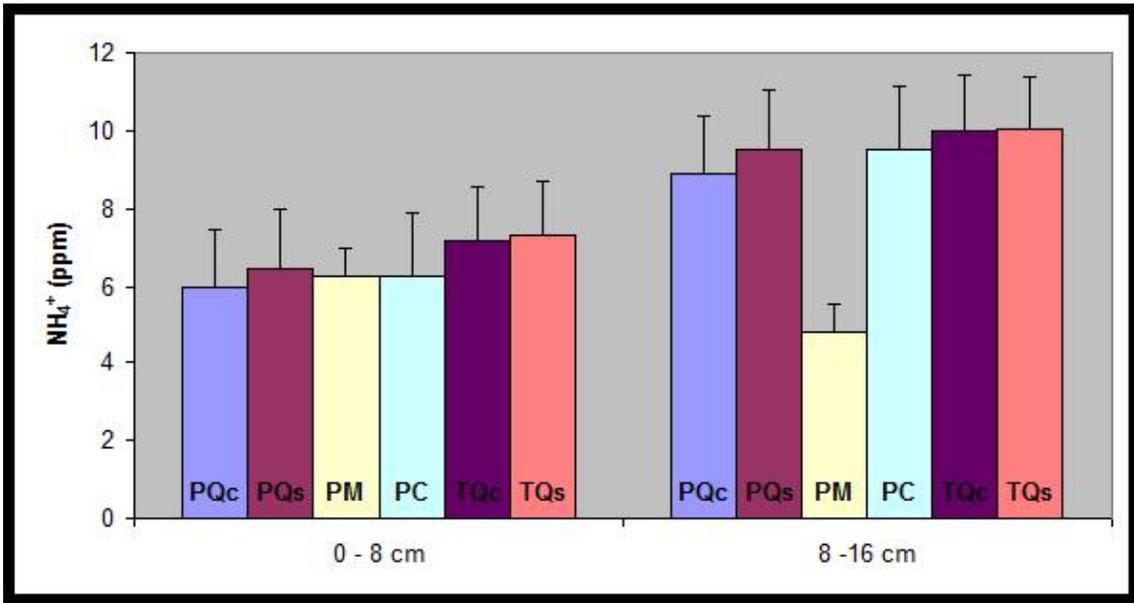


Gráfico 14.- Valores medios (mg.kg⁻¹) y error típico correspondientes al NH₄⁺ medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

A excepción de las zonas bajo matorral de *Panera*, el contenido de NH₄⁺ fue mayor en profundidad que en superficie. Los valores máximos para ambas profundidades se encontraron en *Tiradero*, en las zonas bajo *Q. suber*, igual que ocurrió con el N microbiano. Los valores mínimos en este caso no coinciden para el mismo microsítio ya que en superficie el mínimo se dio en las zonas de *Panera* bajo *Q. canariensis* (5,97 mg.kg⁻¹) y en profundidad en las zonas de matorral también de *Panera* (4,79 mg.kg⁻¹).

Dentro de *Panera*, en la capa superficial no se encontraron diferencias, no obstante en el inferior se hallaron diferencias significativas entre las zonas de claro (9,50 mg.kg⁻¹) y las zonas bajo *Q. canariensis* (8,90 mg.kg⁻¹). En *Tiradero* no se encontraron diferencias en ninguna de las dos profundidades y ambos microsítios presentaron valores muy similares. Al comparar ambas parcelas entre sí, observó que en general las concentraciones de amonio en el suelo de *Tiradero* eran superiores a las halladas en los suelos de *Panera*, tanto en la capa superficial como en la subsuperficial.

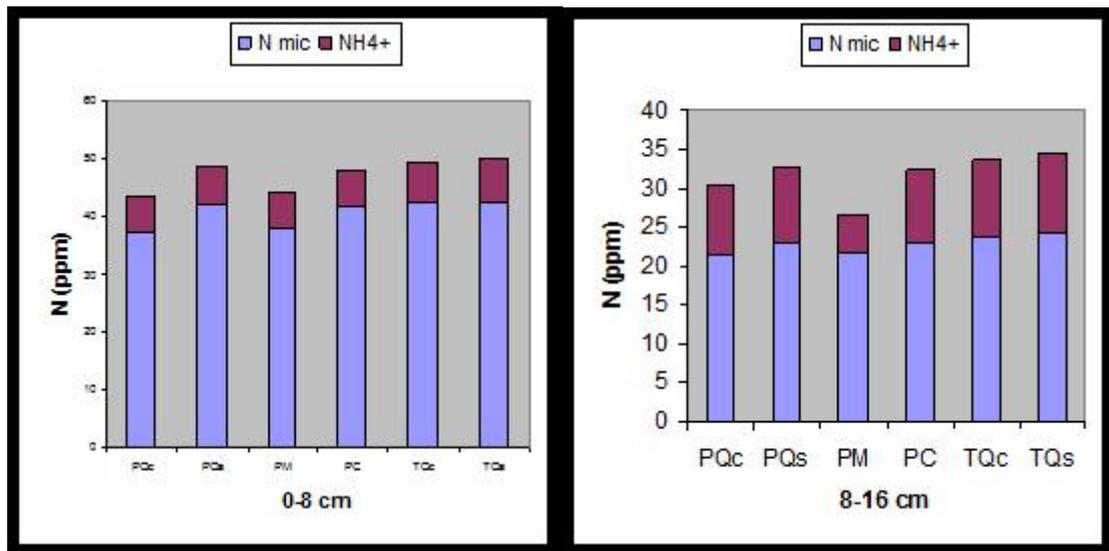


Gráfico 15.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de primavera. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Los valores de la proporción de N inmovilizado en la masa microbiana con respecto al nitrógeno potencialmente disponible fueron muy parecidos en ambas profundidades, dándose el máximo en los suelos bajo *Q. suber* de la parcela de *Tiradero* tanto en la capa superficial como en profundidad, siendo superior en la superficial.

4.1.3.2. Verano.

En la *Tabla 8* se presentan los valores medios en mg.kg^{-1} y de dispersión del contenido en nitrógeno microbiano y amonio extraído por destilación en los seis microsítios estudiados, en verano. Se muestra también el valor medio de la proporción de nitrógeno retenido en la masa microbiana con respecto al total de nitrógeno potencialmente disponible ($\%N_{\text{inm}} = [\text{N}_{\text{mic}} / (\text{N}_{\text{mic}} + \text{NH}_4^+) * 100$). Junto a los valores medios se presenta el resultado de la comparación estadística (Test H y Test U) entre distintos microsítios de manera global (6 microsítios) y diferenciados por parcela de estudio (*Panera* y *Tiradero*).

Tabla 8.- Valores medios (mg.kg-1) y de desviación estándar correspondientes al nitrógeno microbiano (Nmic), al amonio (NH₄⁺) y proporción de nitrógeno potencialmente disponible inmovilizado en la masa microbiana (Nimm) medidas en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Se muestran también los resultados de la comparación estadística entre grupos. Se destacan en negrita las diferencias que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%.

NITRÓGENO			PANERA								TIRADERO				GLOBAL					
			<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Matorral		Claro		Test H		<i>Q. canariensis</i>		<i>Q. suber</i>		Test U		Test H	
			X	Sd	X	Sd	X	Sd	X	Sd	H	p	X	Sd	X	Sd	H	p	H	p
VERANO	0-8 cm	Nmic	32,59	10,67	33,41	9,65	34,67	11,94	34,31	12,51	3,12	0,373	35,07	12,32	35,79	11,84	30,0	0,131	11,65	0,040
		NH ₄ ⁺	51,49	24,17	48,19	22,28	48,59	22,47	53,33	24,32	5,86	0,119	51,26	25,53	53,23	25,46	32,0	0,174	9,18	0,102
		Nimm	48,14	8,32	37,34	9,67	35,89	11,40	49,54	13,39	8,26	0,05	38,93	6,67	40,83	8,28	40,0	0,449	10,67	0,058
	8-16 cm	Nmic	15,23	5,51	14,88	4,98	14,97	5,51	14,89	5,77	1,21	0,751	15,45	5,88	15,78	5,77	37,0	0,326	5,56	0,351
		NH ₄ ⁺	25,02	11,76	24,54	11,46	23,52	9,18	25,40	10,95	3,07	0,380	26,04	11,54	26,38	11,42	40,0	0,450	12,21	0,032
		Nimm	36,29	8,41	37,30	13,31	34,43	11,56	43,70	11,64	3,07	0,38	41,22	10,99	39,92	6,15	46,0	0,762	5,211	0,39

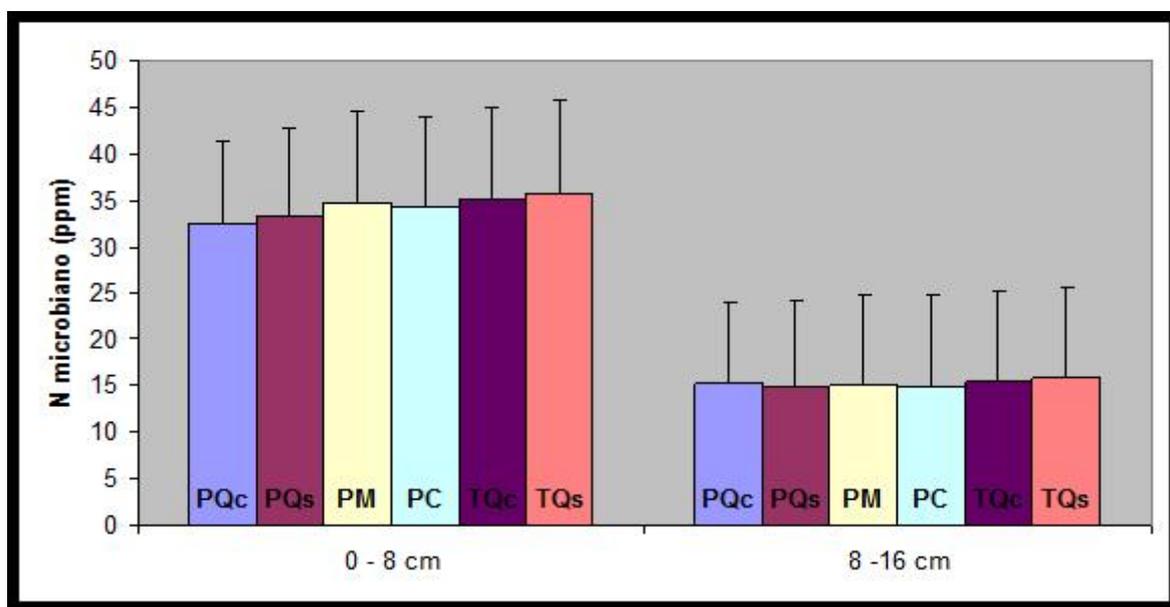


Gráfico 16.- Valores medios y error típico correspondientes al nitrógeno microbiano medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en Panera), PQs (bajo *Q. suber* en Panera), PM (zona de matorral en Panera), PC (zona de claro en Panera), TQc (bajo *Q. canariensis* en Tiradero) y TQs (bajo *Q. suber* en Tiradero).

En la estación estival, en la capa superficial el rango de variación fue de 3,2 mg.kg⁻¹, existiendo únicamente diferencias significativas entre los valores extremos, correspondientes a las zonas bajo *Q. canariensis* de *Panera*, valor mínimo de 32,59 mg.kg⁻¹ y zona bajo *Q. suber* de *Tiradero*, valor máximo 35,8 mg.kg⁻¹. En profundidad no se encontraron diferencias, los valores para los seis microsítios fueron muy parecidos, con un valor medio de 15,2 mg.kg⁻¹ y tan sólo 0,9 mg.kg⁻¹ de diferencia entre el valor máximo (zonas bajo *Q. suber* en *Tiradero*) y el valor mínimo (zonas bajo *Q. suber* en *Panera*).

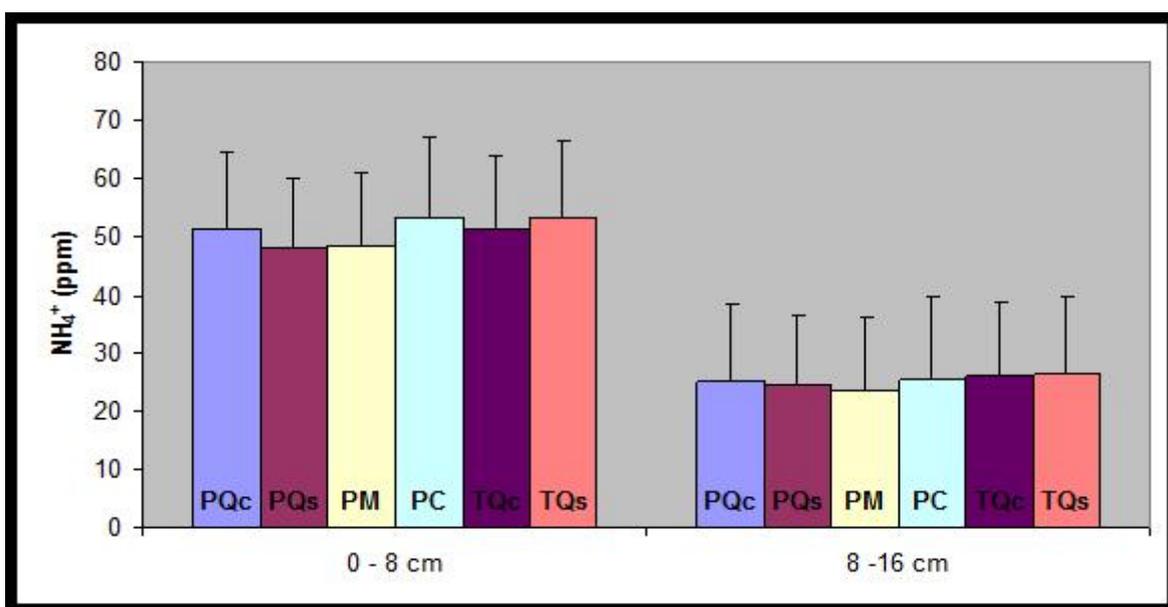


Gráfico 17.- Valores medios y error típico correspondientes al NH₄⁺ medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

Con respecto al amonio determinado en la capa superficial, tanto el valor máximo como el mínimo se hallaron en *Panera*, el máximo con un valor de 53,3 mg.kg⁻¹ en zonas de claro y el mínimo, de 48,2 mg.kg⁻¹, en zonas bajo *Q. suber*, siendo el rango de variación dentro de la parcela de 5,1 mg.kg⁻¹. En *Tiradero*, las concentraciones bajo ambas cubiertas vegetales fueron más parecidas, con una diferencia entre ambas que no llegó a los 2 mg.kg⁻¹. Para la capa en profundidad, el rango de variación fue aun menor, 2,9 mg.kg⁻¹, dándose el valor máximo en zonas bajo *Q. suber* de *Tiradero* (26,38 mg.kg⁻¹) y el mínimo en zonas de matorral de *Panera* (23,5 mg.kg⁻¹). Debido a la escasa variabilidad encontrada las diferencias no llegaron a ser significativas ni dentro de cada parcela ni al comparar las parcelas entre si.

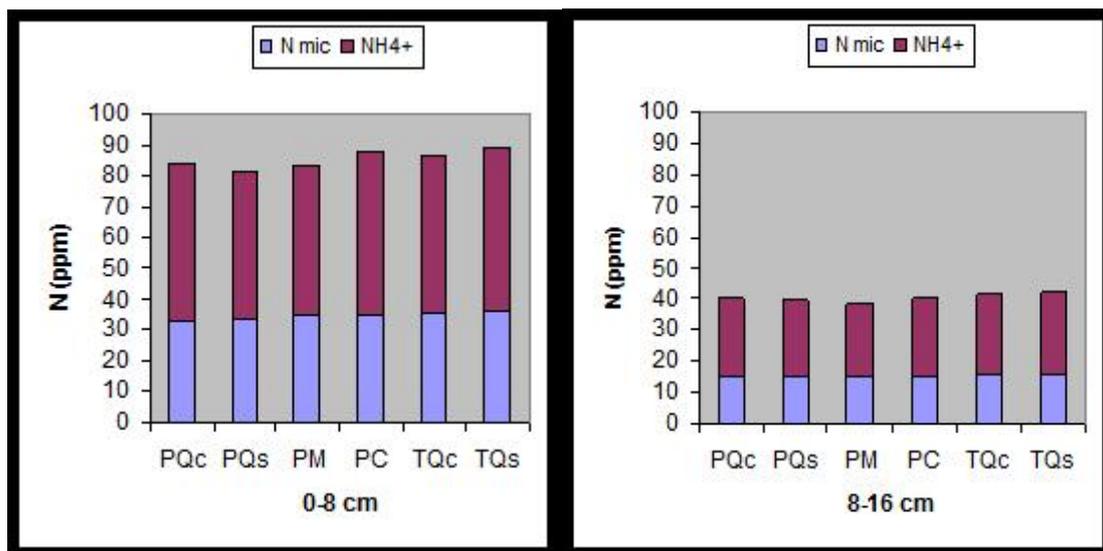


Gráfico 18.- Comparación de las concentraciones de fósforo inmovilizado en la masa microbiana y el P disponible medido en la capa superficial y subsuperficial del suelo (0-8 y 8-16 cm) de los seis microsítios estudiados al final de la estación de verano. Para nombrar los diferentes microsítios se ha seguido la siguiente nomenclatura: PQc (bajo *Q. canariensis* en *Panera*), PQs (bajo *Q. suber* en *Panera*), PM (zona de matorral en *Panera*), PC (zona de claro en *Panera*), TQc (bajo *Q. canariensis* en *Tiradero*) y TQs (bajo *Q. suber* en *Tiradero*).

La proporción de N inmovilizado por la masa microbiana frente al total potencialmente disponible en la estación estival fue muy inferior a la estimada en primavera, existiendo una mayor cantidad de amonio libre en verano que en primavera. Los suelos en las zonas de claro de la parcela de *Panera* presentaron el mayor porcentaje de nitrógeno inmovilizado, alcanzando el 49.5% en la capa superior y el 43.7% en la inferior.

4.2. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES.

4.2.1. CORRELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE NUTRIENTES DISPONIBLES Y RETENIDOS.

Se han calculado los coeficientes de correlación (r) entre todas las variables estudiadas, P Olsen (microbiano y disponible), P Bray (microbiano y disponible) y N (microbiano y NH_4^+) para las dos estaciones, primavera y verano y para las dos profundidades (0 a 8 cm y 8 a 16 cm).

En la *Tabla 9* se indican las variables que presentaron una correlación significativa ($p < 0,05$), ya fuera positiva o negativa, para la estación de primavera. La correlación lineal positiva más importante para esta estación se encontró entre el P Olsen microbiano y el P Bray microbiano con un valor $r = +0,60$, en la capa superficial. El hecho de que esta relación sólo sea significativa en superficie lleva a pensar que existe un cambio en las condiciones del suelo entre ambas profundidades que afecta a la capacidad de extracción de los métodos, extrayendo mayores concentraciones el P Bray en estas circunstancias. Por otra parte es también notable la relación encontrada entre las fracciones de P y N microbiano. Esta relación se ha detectado en otros sistemas forestales (Raghubanshi, 1991). Se debe mencionar que este estudio se ha centrado en la variabilidad del contenido en nutrientes de la biomasa microbiana, sin analizar el contenido en C microbiano o la composición de la comunidad microbiana. Cambios en las condiciones del medio, como la fertilidad, afectan a la composición de la masa microbiana, y con ello pueden alterar también las concentraciones de nutrientes microbianos. Así, los sitios con menor fertilidad tienden a contener una mayor abundancia de hongos capaces de descomponer materiales recalcitrantes, comparada con la de bacterias, que suelen ser más abundantes en suelos más ricos (Zeller *et al.* 2001). La variable composición de la comunidad podría explicar porqué las concentraciones de P y N microbiano no presentan exactamente los mismos patrones.

Mientras que empleando el método Olsen no se detectan relaciones significativas entre el P microbiano y el disponible, los resultados obtenidos con el método Bray indican una relación negativa, aunque pequeña ($r = -0,38$), entre estos parámetros, de modo que allí donde la masa microbiana retiene una mayor cantidad de fósforo existe una menor cantidad de P disponible. Esta situación concuerda con la literatura y sugiere la posibilidad de que la masa microbiana, al emplear los recursos para su propio desarrollo, limite los nutrientes disponibles para la vegetación (Jonasson *et al.* 1996).

Tabla 9.- Correlaciones entre las variables estudiadas, correspondiente a la estación de primavera para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm. En cada celda se recogen únicamente aquellas variables con una correlación (r) significativa ($p < 0,05$) con otra variable que define la celda en la tabla. El signo + se utilizó para aquellas correlaciones que resultaron positivas y el signo -, para las negativas.

PRIMAVERA		P Olsen		P Bray		Nitrógeno		
		Pmic	Pdisp	Pmic	Pdisp	Nmic	NH ₄ ⁺	
P Olsen	Pmic			+0,60		+0,50	+0,42	0-8 cm
	Pdisp			+0,43			+0,45	
P Bray	Pmic		+0,45		-0,38	+0,36	+0,55	
	Pdisp							
Nitrógeno	Nmic	+0,57		+0,47			+0,38	
	NH ₄ ⁺		+0,54	+0,51		+0,32		
8-16 cm								

En la *Tabla 10* se indican las variables que presentaron una correlación significativa ($p < 0,05$), ya fuese positiva o negativa, para la estación de verano. La correlación lineal positiva más importante para esta estación fue, al igual que en primavera, entre el P Olsen microbiano y el P Bray microbiano con un valor $r \approx 0,6$ pero esta vez tanto en la capa superficial como en la subsuperficial. Todas las correlaciones fueron positivas a excepción de la que se halló entre P Olsen disponible y el NH₄⁺, para la capa en profundidad, que fue negativa. También, en la estación estival se detectaron relaciones significativas entre el contenido de P y N microbiano en ambas profundidades. En el caso de la relación entre el P Bray microbiano y disponible, es notable el cambio de sentido en la relación, de modo que en la estación estival las mayores concentraciones de P disponible se encuentran allí donde existe un mayor contenido en P microbiano. Es posible que fruto del aumento de temperaturas y la falta de humedad se haya producido la muerte de parte de la masa microbiana, liberando al medio los nutrientes retenidos durante la primavera. En un estudio llevado a cabo en bosques tropicales y en ecosistemas de sabana, Singh *et al.* 1992 constataron que la dinámica en la disponibilidad de los nutrientes era consecuencia de la mineralización de los tejidos microbianos lábiles, tras su muerte en periodos desfavorables y la inmovilización de los nutrientes durante la época de crecimiento.

Tanto durante la primavera como durante el verano existe una relación significativa y positiva entre las concentraciones de N microbiano y de NH₄⁺, que se repite en ambas profundidades. Esta relación sugiere que no existe una competencia por

este recurso entre la masa microbiana y la vegetación, sino que hay cantidad suficiente para satisfacer las necesidades de ambos. Podríamos sugerir, por tanto, que en estos bosques el nitrógeno no parece ser un nutriente limitante, al contrario de lo que ocurre con el P.

Tabla 10.- Correlaciones entre las variables estudiadas, correspondiente a la estación de verano para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm. En cada celda se recogen únicamente aquellas variables con una correlación (r) significativa ($p < 0,05$) con otra variable que define la celda en la tabla. El signo + se utilizó para aquellas correlaciones que resultaron positivas y el signo -, para las negativas.

VERANO		P Olsen		P Bray		Nitrógeno		
		Pmic	Pdisp	Pmic	Pdisp	Nmic	NH ₄ ⁺	
P Olsen	Pmic			+0,64	+0,27	+0,61		0-8 cm
	Pdisp			+0,44	+0,41	+0,34		
P Bray	Pmic	+0,66			+0,37	+0,41		
	Pdisp		+0,43			+0,27		
Nitrógeno	Nmic	+0,60		+0,37			+0,33	
	NH ₄ ⁺	+0,29	-0,34			+0,31		
8-16 cm								

4.2.2. CORRELACIONES ENTRE LAS FRACCIONES DE P Y N MICROBIANO Y LAS CONDICIONES ABIÓTICAS DEL MEDIO.

Se han calculado los coeficientes de correlación (r) entre las variables P Olsen microbiano, P Bray microbiano y N microbiano para las dos estaciones, primavera y verano y para las dos profundidades (0 a 8 cm y 8 a 16 cm) con las condiciones abióticas del medio (materia orgánica, humedad de campo y humedad determinada en el laboratorio, pH en H₂O y en KCl, nitrógeno total, arcilla, limo y arena). Igualmente, se realizó el análisis de correlaciones globales empleando el conjunto de todos los datos (para ambas estaciones y ambas profundidades). Para realizar este análisis se emplearon no sólo los datos recogidos en este proyecto sino también datos recogidos anteriormente por Polo (2006) y Pozuelo (2007).

En la *Tabla 11* se destacan en negrita las variables que presentaron una correlación significativa ($p < 0,05$), ya fuera positiva o negativa, tanto para la estación de primavera como para la de verano y de una forma global y para dos profundidades: 0-8 cm y de 8-16 cm.

Tabla 11.- Correlaciones entre las variables estudiadas y las condiciones abióticas del medio para dos estaciones, primavera y verano, de forma global y para dos profundidades, de 0 a 8 cm y de 8-16 cm. Se destacan en negrita las correlaciones que resultaron significativas considerando un nivel de significación del 5%. El signo + se utilizó para aquellas correlaciones que resultaron positivas y el signo -, para las negativas.

			M.O.	HUMEDAD		pH		N _T	TEXTURA			
				Campo	Laborat.	H ₂ O	KCl		Arcilla	Limo	Arena	
P OLSEN	PRIMAVERA	0-8	r	+0,38	+0,46	+0,53	+0,19	+0,41	+0,02	+0,19	-0,06	-0,13
			p	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,86	0,14	0,65	0,31
		8-16	r	+0,90	+0,12	-0,01	-0,04	+0,14	-0,11	-0,06	-0,11	+0,09
			p	0,49	0,37	0,96	0,74	0,30	0,38	0,66	0,41	0,49
	VERANO	0-8	r	+0,12	-0,15	+0,21	+0,28	+0,35	+0,01	+0,18	-0,03	-0,10
			p	0,36	0,24	0,11	0,03	0,01	0,94	0,16	0,82	0,43
		8-16	r	-0,04	-0,10	+0,05	+0,30	+0,30	-0,02	+0,25	-0,10	-0,14
			p	0,77	0,44	0,72	0,02	0,02	0,86	0,05	0,44	0,29
P BRAY	PRIMAVERA	0-8	r	+0,57	+0,29	+0,54	+0,11	+0,28	+0,23	+0,22	+0,21	-0,25
			p	0,00	0,02	0,00	0,39	0,03	0,08	0,08	0,11	0,05
		8-16	r	+0,29	+0,42	+0,53	+0,36	+0,43	+0,23	+0,39	+0,22	-0,37
			p	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08	0,00	0,10	0,00
	VERANO	0-8	r	+0,06	-0,24	+0,08	-0,27	-0,24	-0,25	-0,23	-0,19	+0,25
			p	0,68	0,07	0,54	0,03	0,07	0,06	0,08	0,14	0,05
		8-16	r	-0,09	-0,24	-0,12	+0,09	+0,12	-0,11	+0,02	-0,18	+0,05
			p	0,50	0,06	0,38	0,47	0,36	0,40	0,86	0,17	0,72
NITRÓGENO	PRIMAVERA	0-8	r	+0,51	+0,41	+0,52	+0,46	+0,58	+0,52	+0,52	+0,30	-0,50
			p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
		8-16	r	+0,37	+0,50	+0,52	+0,42	+0,57	+0,26	+0,47	+0,26	-0,44
			p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00
	VERANO	0-8	r	+0,47	+0,03	+0,46	+0,37	+0,36	+0,33	+0,35	+0,30	-0,34
			p	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01
		8-16	r	+0,23	-0,03	+0,21	+0,40	+0,35	+0,19	+0,27	+0,13	-0,25
			p	0,07	0,82	0,11	0,00	0,01	0,14	0,04	0,30	0,06
GLOBAL	P Olsen	r	+0,41	+0,13	+0,46	+0,14	+0,23	0,00	+0,12	-0,03	-0,07	
		p	0,00	0,04	0,00	0,03	0,00	0,96	0,06	0,61	0,27	
	P Bray	r	+0,51	+0,16	+0,51	+0,06	+0,11	+0,04	+0,08	+0,04	-0,08	
		p	0,00	0,02	0,00	0,39	0,09	0,50	0,19	0,53	0,24	
	Nitrógeno	r	+0,61	+0,22	+0,51	+0,26	+0,30	+0,22	+0,27	+0,16	-0,26	
		p	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	

Según muestra la *Tabla 11* las concentraciones de P microbiano en el suelo durante la estación estival no parecen guardar relación significativa con las variables abióticas medidas. Las limitadas concentraciones detectadas para ambas profundidades en esta estación, correspondientes a poblaciones posiblemente mermadas tras la sequía estival, no mostraron diferencias significativas entre los microsítios estudiados, por lo que parece lógico que no se detecten relaciones significativas con las variables del medio. El contenido en materia orgánica del suelo y la humedad resultaron ser las dos variables más relacionadas con las concentraciones P y N microbiano, siendo su relación positiva. Esta correlación entre la humedad de suelo y la biomasa microbiana ha sido anteriormente descrita en trabajos como el de Santruckova (1992) o Saetre (1992). De este modo, por ejemplo, los suelos bajo cobertura arbórea en *Panera*, que presentan los mayores contenidos en materia orgánica y mayor humedad, contienen también las mayores concentraciones de P microbiano, mientras que los suelos de *Tiradero*, con menor humedad y materia orgánica muestran también un menor contenido en P microbiano. Cabe destacar que de las dos estimas de humedad realizadas, humedad en campo y humedad determinada en el laboratorio, es la segunda la que presenta una mayor relación con los nutrientes microbianos. La pedregosidad del suelo estudiado pudo alterar las medidas hechas en campo con el TDR, aumentando el margen de error, lo que conlleva una peor relación con las variables estudiadas.

Otra variable relacionada de modo significativo y positivamente con el N y P microbiano es el pH, aunque su relación es más fuerte con el primero que con el segundo. Con relación a las fracciones granulométricas del suelo, estas se relacionan estadísticamente con el N microbiano, pero no con el P microbiano. El signo de esta relación es positivo para el porcentaje en arcilla y negativo para el de arena, existiendo por tanto una mayor concentración de N microbiano en ambientes arcillosos que en arenosos (Insam *et al.* 1991). Sugiere que las partículas de arcilla protegen a la masa microbiana de sus potenciales depredadores, a la par que mantienen la humedad de suelo, lo que favorece a las poblaciones microbianas del suelo.

V. CONCLUSIONES.

5. CONCLUSIONES.

1. Se han estudiado las concentraciones de N y P microbiano, así como de P disponible y NH_4^+ , en muestras superficiales (0-8 cm) y subsuperficiales (8-16 cm) de suelo en un total de sesenta puntos correspondientes a seis tipos de microsítios, caracterizados por presentar una cubierta vegetal diferente y ubicados en dos parcelas experimentales, *Panera* y *Tiradero*, ambas en el Parque Natural de los Alcornocales.
2. Los valores obtenidos para el fósforo, tanto microbiano como disponible, son inferiores a las referencias en la literatura. Esto concuerda con trabajos desarrollados anteriormente en la zona que mostraban un importante déficit de P en los tejidos foliares de las especies arbóreas presentes en la zona de estudio y apoya la hipótesis de que estos bosques presentan una importante limitación de fósforo. Por otra parte, el alto porcentaje de fósforo inmovilizado en la biomasa microbiana puede ser indicador de una situación de competencia por este recurso entre las plantas y los microorganismos del suelo.
3. Se observa una importante variabilidad en las concentraciones de P microbiano, entre microsítios, aunque el patrón es diferente en cada estación. Así, en primavera, los suelos bajo cobertura arbórea y de matorral en *Panera* presentan valores superiores a los encontrados en zonas de claro y bajo dosel arbóreo en *Tiradero*. En verano, son los suelos bajo vegetación arbustiva o en claros los que presentan las menores concentraciones.
4. El N microbiano y las concentraciones de NH_4^+ en el suelo presentan valores entre normales y altos comparados con los reflejados en la literatura y no muestran apenas diferencias entre los microsítios estudiados.
5. El análisis de las correlaciones entre las variables muestra una relación significativa entre el N y el P microbiano. El contenido de materia orgánica y la humedad del suelo fueron las dos variables más estrechamente relacionadas con las concentraciones de N y P microbiano. En menor medida y principalmente relacionadas con el N inmovilizado en la biomasa microbiana, aparecen el pH, el contenido en N total y los porcentajes de arcilla y arena del suelo.

VI. BIBLIOGRAFÍA.

6. BIBLIOGRAFÍA.

Anónimo (2005) *PORN / PRUG / PDS Parque Natural Los Alcornocales*. Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, España.

Bellinfante, N., Gómez, I.A., Ruiz, M.A., y Paneque, G. (1997) Suelos sobre areniscas silíceas del Parque Natural Los Alcornocales. *Edafología*, **3-2**, 309-314.

Blanco, R., Clavero, J., Cuello, A., Marañón T., y Seisdedos, J.A. (1991) Sierras del Aljibe y del Campo de Gibraltar. En: *Guías naturalistas de la provincia de Cádiz*, **3**, 195-206. Diputación de Cádiz, Cádiz, España.

Bray R.H. y Kurtz L.T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.

Brookes, P.C., Powlson, D.S., y Jenkinson, D.S. (1982) Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **14**, 319-329.

Coca, M. (2001) *Árboles, Arbustos y Matas del Parque Natural Los Alcornocales (Cádiz-Málaga)*. Orni Tour (ed.). Jerez de la Frontera, Cádiz, España.

Coca, M. (1999) *Efectos de la intervención humana y de los factores ambientales sobre la vegetación del alcornocal en el "Parque Natural Los Alcornocales" (Cádiz-Málaga)*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla.

Didon, J. (1969). *Étude Géologique du Campo de Gibraltar*. Tesis Doctoral. Universidad de París. París (Francia).

Domínguez, A. (1997) *Tratado de Fertilización*. Mundi Prensa. Madrid.

Díaz-Villa, M. D., Marañón, T., Arroyo, J. y Garrido, B. (2003) Soil seed bank and floristic diversity in a forest-grassland mosaic in southern Spain. *Journal of Vegetation Science*, **14**, 701-709

- Binkley, D. y Fisher, R.F., (2000)** *Ecology and management of forest soils*. John Wiley, 3ª edición. New York.
- Dumontet, S., Dinel, H., Scopa, Z. A., Mazzatura, A. y Saracino, A. (1996)** Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of a pine forest soil from a dunal mediterranean environment. *Soil biol & biochem*, **28**, 1467-1475.
- Fontboté, J.M. (1983)** *Mapa Geológico de España*, E. 1:200000. Hoja nº 87, IGME, Madrid.
- Fontboté, J.M. (1986)** *La Cordillera Bética. Las zonas internas y unidades adyacentes*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
- García, C., Gil, F., Hernández y T., Trasar, C. (2003)** Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en suelos: *Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana*. Mundi Prensa.
- García, L.V. (2003)**. Controlling the false discovery rate in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 8: 553-554.
- García, L. V. (2004)**. Escaping the Bonferroni iron claw in ecological studies. *Oikos* 105: 657-663.
- García, L.V.; Polo, A.; Maltez-Mouro, S.; Gutiérrez, E.; Pérez-Ramos, I.M.; Jordán, A. y Martínez-Zavala, L. (2006)**. Relación entre la Composición y Densidad de la Cubierta Vegetal Leñosa y las Características Superficiales del Suelo en Bosques Mixtos de Quercus del Sur de la Península Ibérica. *Actas II Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo*, Huelva: 522-530.
- Gavala, J. (1929)** La Geología del estrecho de Gibraltar. *Boletín del Instituto Geológico y minero de España*, **51**, 3-35.

- Gobat JM., Aragno M.A, y Matthey W. (2004)** *The Living Soil: Fundamentals of Soil Science and Soil Biology*. Science Publishers. Switzerland.
- Herrera, C.M., Jordano, P., López-Soria, L., y Amat, J.A. (1994)** Recruitment of a mast-fruiting, bird-dispersed tree: bridging frugivore activity and seedling establishment. *Ecological Monographs*, **64**, 315-344.
- Insam, H., Mitchell, C.C. y Dormarr, J.F. (1991)** Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. *Soil biology & biochemistry*, **23**, 459-464.
- Joergensen, R.G. (1995)** *Methods in Applied. Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. London San Diego, California.
- Jonasson, S., Michelsen, A., Schmidt, I.K., Nielsen, E. V. y Callaghan, T. V. (1996)** Microbial biomass C, N and P in two arctic soils and responses to addition of NPK fertilizer and sugar: implications for plant nutrient uptake. *Oecologia*, **106**, 4.
- Jordán, A., Ruiz, A., Gómez, I., y Limón, F. (1997)** Principales tipos de suelos asociados al bosque de *Quercus* sp. y brezal en el Parque Natural “Los Alcornocales”. *Almoraima*, **19**, 231-240.
- Jordán, A. (2000)** *El medio físico del Campo de Gibraltar: Unidades Geomorfológicas y Riesgo de Erosión*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.
- Junta de Extremadura, (1992).** *Interpretación de análisis de suelo, foliar y agua de riego. Consejo de abonado (normas básicas)*. Mundi Prensa. Madrid, 214 pp.
- Métodos oficiales de análisis de suelos y aguas (1982).** Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Microsoft Corporation (2002).** Microsoft Excel 2003. Redmond. Washington.

- Murphy, J y Rile, J.P. (1962).** A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chemica Acta*. 27:31-36
- Navarro, C.M., Pérez-Ramos , I.M., y Marañón, T. (2004)** Aporte de hojarasca al suelo en un bosque mediterráneo. *Almoraima*, **31**, 119-127.
- Navarro Blaya, S y Navarro García, G. (2003)** *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. (2ª Edición), Mundi Prensa.
- Noejovich, L. y Marañón, T. (2002)** Heterogeneidad del medio físico y biodiversidad del bosque de *Quercus* en el Parque Natural Los Alcornocales. *Almoraima*, **27**, 213-224.
- Ojeda, F., Marañón, T., y Arroyo, J. (2000)** Plant diversity patterns in the Aljibe Mountains (S. Spain): a comprehensive account. *Biodiversity and Conservation*, **9**, 1323-1343.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA (1954)** Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture. Circular 939.
- Polo, A. (2006).** *Heterogeneidad edáfica en una parcela experimental de bosque mixto de Quercus suber y Quercus canariensis del P. N. Los Alcornocales (La Saucedá, Málaga)*. Proyecto Fin de Carrera, EUITA. Universidad de Sevilla.
- Pozuelos, A., (2007).** *Caracterización química de las hojas, desfronde y suelo subyacente en una parcela experimental de alcornocal-quejigar del Parque Natural de los Alcornocales (la Saucedá, Málaga)* Proyecto fin de carrera, EUITA, Universidad de Sevilla.
- Raghubanshi, A.S. (1991)** Dynamics of soil biomass C, N and P in a dry tropical forest in India. *Biol.Fert.Soils*12: 55-59

- Romo, A. M. (1997)** *Árboles de la Península Ibérica y Baleares*. Planeta. Barcelona, España.
- Saetre, P. (1999)** Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. *Ecography* 22, 183-192.
- Santruckova, H. (1992)** Microbial biomass, activity and soil respiration in relation to secondary succession. *Pedobiologia* 36. 341-350.
- Schneider, K., Turrion, M.B., Grierson P.F., y Gallardo J.F. (2001)** Phosphatase activity, microbial phosphorous and fine root growth in forest soil in the Sierra de Gata, western central Spain.
- Singh, J.S., Raghubanshi, A.S., Singh, R.S. y Srivastava, S. C. (1989)** Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*. 338, 499 - 500
- Sparks, D.L. (1996)** (Editor) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Madison: American Society of Agronomy Soil Science Society of America.
- Statsoft. (2001)**. STATISTICA, version 6. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Torres, E. (1995)** *Estudio de los principales problemas silvícolas de los alcornoques del macizo del Aljibe (Cádiz y Málaga)*. Tesis Doctoral, ETSIM, Madrid.
- Urbieto, I. R., Zavala, M. A. y Marañón, T. (2004)** Distribución y abundancia de alcornoque (*Quercus suber* L.) y quejigo (*Quercus canariensis* Willd.) y su relación con factores ambientales en la provincia de Cádiz. *Revista de la Sociedad Gaditana de Historia Natural*, 4, 181-187.
- Valdés, B., Talavera, S. y Fernández Galiano, E. (1987)** *Flora Vascular de Andalucía Occidental*, 3 vols. Ketres, 1680 pp. Barcelona, España.

Vance, E.D., Brookes, P.C. y Jenkinson, D.S. (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**, 703-707.

Vieira Natividad, J. (1950) *Subericultura*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Zeller, V., Bardgett, R.D. y Tappeiner, U (2001) Site and management effects on soil microbial properties of subalpine meadows: a study of land abandonment along a north–south gradient in the European Alps. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**, 639-649.

WEBS.

DELGADO, Mario. *Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal*. 2004. DirecciónURL: <<http://www.oriusbiotecnologia.com/site/index.php?id=20,63,0,0,1,0>> [Consulta: viernes, 12 de diciembre de 2008].

GARCÍA NAVARRO, Arturo. *El suelo como hábitat*. Ayuda docente del programa de Edafología. Universidad de Extremadura. Departamento de Biología y Producción de los Vegetales. Última actualización del sitio: 31/10/05. Dirección URL: <<http://www.unex.es/edafo/CAEdProgTeor.html>> [Consulta: lunes, 15 de diciembre de 2008].

IBAÑEZ, Juan José. *Funciones de los organismos del suelo: la biótica edáfica*. 2007. DirecciónURL: <<http://weblogs.madrimasd.org/universo/archive/2007/03/25/62254.aspx>> [Consulta: jueves, 18 de diciembre de 2008]

